

INVESTIGACIÓN ACADÉMICA

COMO PILAR DE CAMBIO
Y DESARROLLO

INVESTIGACIÓN ACADÉMICA COMO PILAR DE CAMBIO Y DESARROLLO

COLECCIÓN RESULTADO DE INVESTIGACIÓN

Primera Edición 2025 Vol

Editorial EIDEC

Sello Editorial EIDEC (978-958-53018) NIT 900583173-1

ISBN: 978-628-96986-6-4

Formato: Digital PDF (Portable Document Format)

DOI: <http://doi.org/10.34893/f0309-9252-3716-b>

Publicación: Colombia

Fecha Publicación: 26/12/2025

Coordinación Editorial

Escuela Internacional de Negocios y Desarrollo Empresarial de Colombia – EIDEC Centro de Investigación Científica, Empresarial y Tecnológica de Colombia – CEINCET Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES

2

Revisión y pares evaluadores

Centro de Investigación Científica, Empresarial y Tecnológica de Colombia – CEINCET Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES



CONTENIDO

CAPÍTULO 1

ALFABETIZACIÓN DIGITAL Y SU INFLUENCIA EN LA ACTITUD HACIA LA INVESTIGACIÓN EN ESTUDIANTES DE EDUCACIÓN SUPERIOR 07
Jhoansson Victor Manuel Quilia Valerio; Maribel Rimache Inca; Segundo Oswaldo Pastor Huamán; Margaret Aurora Riveros Avila; Thais Geraldine Quilia Valerio

CAPÍTULO 2

MÁS ALLÁ DE LA CONECTIVIDAD: DESARROLLANDO LA ALFABETIZACIÓN DIGITAL CON COMUNIDADES DE APRENDIZAJE EN LÍNEA 23

Susy Karina Dávila Panduro; Linda Priscilla López Alvarado; Rommel Erwin Quintanilla Huamán; Lita Macedo Torres; Rafael Vásquez Alegría

CAPÍTULO 3

ÁCIDO CAFEICO Y SUS ÉSTERES NATURALES COMO AGENTES ADYUVANTES EN ONCOLOGÍA 46
Cristian Paz; Cecilia Villegas

CAPÍTULO 4

DIABETES MELLITUS: MECANISMOS EPIGENÉTICOS Y TERAPIAS NATURALES 77
Cristian Paz; Muhammad Javid Iqbal

CAPÍTULO 5

FARMACOTERAPIA DE LA ESCLEROSIS MÚLTIPLE: FÁRMACOS APROBADOS, DIANAS MOLECULARES Y CONSIDERACIONES FARMACOGENÉTICAS 109
Cristian Paz; Sofia Bravo Bouchat; Cecilia Villegas

CAPÍTULO 6

EL USO DE CHATBOTS Y LA SATISFACCIÓN DE CLIENTES EN EMPRESAS FINANCIERAS PERUANAS 141
Flor Angélica Lavanda Reyes; Rosa Elvira Ruiz Reyes; Mario Gustavo Reyes Mejía; Luis Alberto Castillo Samanamud; Julia Luzmila Reyes Ruiz

CAPÍTULO 7

**CULÉN (OTHOLOBIUM GLANDULOSUM) UNA PLANTA MEDICINAL MAPUCHE
CON AMPLIAS PROPIEDADES TERAPÉUTICAS162**
Cristian Paz; Muhammad Javid Iqbal

CAPÍTULO 8

**MÁS ALLÁ DEL JUEGO: ESCAPE ROOMS Y DESARROLLO DEL TALENTO
HUMANO 189**
Camila Salazar Ramírez; Eliana Quiroz González; Sebastián Pinzón Salazar

CAPÍTULO 9

**GESTIÓN FINANCIERA EN PYMES PERUANAS: APROXIMACIÓN
INTERNACIONALES 205**
Ricardo Villena Presentacion; César Hildebrando Chávez Calderón; Miguel Antonio Riojas Cieza; Alberto Barrenechea Romero; Heydrich Didier Gutiérrez Alamo

CAPÍTULO 10

**ADOPCIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO DE REGISTROS ELECTRÓNICOS Y EL
CUMPLIMIENTO TRIBUTARIO DE LOS CONTRIBUYENTES 218**
Jhoansson Victor Manuel Quilia Valerio; Emma Zoraida Roman Cansaya

5

CAPÍTULO 11

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE DIAGNÓSTICO Y PRUEBA
PARA INSTRUMENTOS DEL SISTEMA PITOT ESTÁTICO Y ENCONDER DE
AERONAVES EN LAS AERONAVES DEL EJÉRCITO NACIONAL DE
COLOMBIA 232**
Jorge Enrique Rodríguez Navarro; Rubén Darío Cuadros Antolínez; Johnny Fernando Parrado Rodríguez;
Álvaro Plata Páez; Julian Enrique Barrero García; Monica Estefania Hernández García

CAPÍTULO 12

**TENSIONES EN LA CONFIGURACIÓN DE LA PRAXIS PEDAGÓGICA EN LA
FORMACIÓN PROFESIONAL DOCENTE EN UN PROGRAMA DE LICENCIATURA
EN ESPAÑOL E INGLÉS. UNA EVALUACIÓN COMPRENSIVA DE DEBILIDADES
DE LA PRÁCTICA DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS ESTUDIANTES Y
DOCENTES 255**
Jhojan Jiménez Quintero; Jorge Oswaldo Sánchez Buitrago

CAPÍTULO 13

LA ESCUELA COMO TERMÓMETRO TERRITORIAL: POBREZA ENERGÉTICA Y
DESIGUALDAD EDUCATIVA 287
Daniel Manjarrés Herrera

CAPÍTULO 14

RESPONSABILIDAD SOCIAL EMPRESARIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE EN
EL PROYECTO ESPECIAL SIERRA CENTRO SUR 300
Katia Choque Quispe; Delma Diana Reynoso Cani Cani; Henry Wilfredo Agreda Cerna; Jusmarly Rivera
Olazabal; Edward Alberto Alonzo Lanado; Nátaly Stéfanie Herrera Cumpa

ALFABETIZACIÓN DIGITAL Y SU INFLUENCIA EN LA ACTITUD HACIA LA INVESTIGACIÓN EN ESTUDIANTES DE EDUCACIÓN SUPERIOR¹

DIGITAL LITERACY AND ITS INFLUENCE ON ATTITUDES TOWARD RESEARCH IN HIGHER EDUCATION STUDENTS

Jhoansson Víctor Manuel Quilia Valerio ²

Maribel Rimache Inca ³

Segundo Oswaldo Pastor Huamán ⁴

Margaret Aurora Riveros Ávila ⁵

Thais Geraldine Quilia Valerio ⁶

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES⁷

¹Derivado del proyecto de investigación: Alfabetización digital como factor de impulso a la cultura investigativa en la educación superior.

²Contador Público Colegiado, Maestro en Administración de Negocios MBA y egresado del doctorado en Educación. Investigador registrado en el Registro Nacional Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (RENACYT). Docente Asesor de Tesis en la Universidad Tecnológica del Perú. correo electrónico: C30007@utp.edu.pe.

³Contadora Pública Colegiada, Magister en Finanzas y en Administración y Dirección de Empresas, y egresada del doctorado en Ciencias Contables. Docente en la Universidad Tecnológica del Perú. correo electrónico: C24859@utp.edu.pe.

⁴ Educador de Ciencia y Tecnología, Magister en Tecnología Educativa y Maestro en Administración de Empresas. Egresado del doctorado en Educación, Docente en la Pontificia Universidad Católica del Perú, correo electrónico: opastor@pucep.edu.pe.

⁵ Contadora Pública Colegiada, Maestra en Gestión Pública, Docente en la Universidad César Vallejo, correo electrónico: mariverosa@unavirtual.edu.pe.

⁶ Psicóloga Colegiada, egresada de la Maestría en Investigación y Docencia Universitaria. Psicóloga en Educación. correo electrónico: tgquiliav@unavirtual.edu.pe.

⁷Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

El presente trabajo analiza la influencia de la alfabetización digital en la actitud hacia la investigación en estudiantes universitarios de pregrado. La investigación se justifica ante la necesidad de fortalecer competencias digitales que contribuyan al desarrollo de una actitud favorable hacia la investigación científica, elemento clave para el desempeño académico y profesional en contextos altamente digitalizados. Para ello, se aplicó un enfoque cuantitativo de tipo correlacional y diseño no experimental, utilizando como técnica principal la regresión logística ordinal. Los resultados evidencian que la alfabetización digital influye significativamente en la actitud hacia la investigación, explicando un 77,0% de la varianza total. A nivel dimensional, se identificó que esta competencia incide en el desarrollo de trabajos académicos (72,0%), en la originalidad y relevancia de las investigaciones (81,0%) y en la praxis ética investigativa (83,0%). Asimismo, se observó que la mayoría de los estudiantes presentan un nivel medio o alto tanto en alfabetización digital como en actitud hacia la investigación. En conclusión, se confirma que fortalecer las competencias digitales resulta esencial para estimular una disposición investigativa crítica, creativa y ética. Estos hallazgos plantean implicancias relevantes para el diseño de políticas educativas universitarias orientadas al fortalecimiento de capacidades investigativas desde un enfoque digital e integral.

PALABRAS CLAVE: Alfabetización digital, actitud hacia la investigación, competencias digitales, educación superior, praxis ética, investigación académica.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of digital literacy on students' attitudes toward research at the undergraduate level. The research is grounded in the growing need to strengthen digital competencies that support the development of a positive attitude toward scientific inquiry—an essential element for academic and professional success in highly digitized environments. A quantitative, correlational, non-experimental design was employed, with ordinal logistic regression as the primary analytical technique. The results show that digital literacy significantly influences students' attitudes toward research, explaining 77.0% of the total variance. At the dimensional level, this competency impacts the development of academic work (72.0%), the originality and relevance of research (81.0%), and ethical research practice (83.0%). Additionally, most students exhibited medium to high levels of both digital literacy and research attitude. In conclusion, the findings confirm that strengthening digital competencies is crucial to fostering a critical, creative, and ethically grounded research disposition. These results have important implications for the design of university education policies focused on enhancing research capabilities from a comprehensive and digitally integrated approach.

Keywords: Digital literacy, research attitude, digital competences, higher education, ethical practice, academic research.

INTRODUCCIÓN

En la era actual, caracterizada por una profunda transformación digital, el conocimiento y dominio de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se ha convertido en un componente esencial de la vida académica, profesional y social. En este escenario, la alfabetización digital ha cobrado un papel protagónico como una competencia indispensable para desenvolverse de forma eficaz, crítica y ética en entornos educativos mediados por la tecnología. De acuerdo con Ng (2021), la alfabetización digital comprende no solo la capacidad para acceder, evaluar y comunicar información digital, sino también el desarrollo de habilidades cognitivas y socioemocionales que permitan interactuar de manera activa y responsable en entornos virtuales. Esta visión supera el enfoque tradicional centrado exclusivamente en el uso instrumental de la tecnología y la concibe como una habilidad transversal que potencia el aprendizaje autónomo, la colaboración, la creatividad y la construcción de conocimiento (Selfa-Sastre et al., 2022; Cabero-Almenara et al., 2022).

En el contexto de la educación superior, esta competencia resulta particularmente crucial, ya que permite a los estudiantes afrontar los desafíos de un entorno académico en constante cambio, marcado por la sobreabundancia de información, la diversificación de fuentes y la necesidad de discernir con criterio entre datos relevantes y aquellos que carecen de rigor científico (Esteve et al., 2020). Las universidades, como centros de generación y difusión del conocimiento, están llamadas a formar estudiantes digitalmente competentes, capaces de utilizar los recursos tecnológicos no solo como medios de consumo, sino como herramientas que les permitan investigar, innovar y comunicar resultados en un entorno globalizado y cada vez más exigente (Alcántara-Pilar et al., 2024; Lopez-Nuñez et al., 2024).

En este contexto, la actitud hacia la investigación se presenta como otra dimensión clave en la formación universitaria. La investigación científica constituye una de las funciones sustantivas de la educación superior, junto con la docencia y la proyección social, por lo que fomentar una actitud positiva hacia la misma resulta esencial para el desarrollo integral del estudiante (Rodríguez-Gómez & Gairín, 2020). Esta actitud involucra aspectos cognitivos, afectivos y conductuales, tales como el interés, la disposición, la valoración del conocimiento científico y la motivación para generar nuevas ideas y resolver problemas mediante metodologías sistemáticas aplicadas a la investigación (Alvarado et al., 2021).

Sin embargo, diversos estudios señalan que muchos estudiantes de educación superior aún manifiestan una actitud ambivalente o negativa hacia la investigación, motivada en parte por la falta de formación metodológica, el escaso acompañamiento docente, y la percepción de que la investigación es una actividad lejana, difícil o irrelevante para su futuro profesional (Gonzales et al., 2023). En este sentido, resulta imperativo identificar factores que podrían incidir en el fortalecimiento de una actitud favorable hacia la investigación, siendo la alfabetización digital uno elemento potencial con mayor proyección (Şahin et al., 2023).

La literatura reciente destaca una estrecha relación entre el desarrollo de competencias digitales y el fortalecimiento de la actitud hacia la investigación. Según Getenet, Campbell y Bull (2024), la alfabetización digital incrementa la autoconfianza de los estudiantes para enfrentarse a procesos de búsqueda, análisis e interpretación de información científica, así como para el uso de herramientas tecnológicas aplicadas a la sistematización y comunicación de resultados. En el mismo sentido, Lee y Lee (2021) encontraron que estudiantes con mayor dominio digital presentan niveles más altos de autoeficacia investigativa y mayor intención de participar en actividades académicas de carácter científico, especialmente en entornos multidisciplinares de educación superior.

Asimismo, las competencias digitales pueden actuar como facilitadoras en el desarrollo de habilidades investigativas, al permitir el acceso a bases de datos académicas, el uso de gestores bibliográficos, programas estadísticos, plataformas de trabajo colaborativo, y espacios virtuales para la divulgación científica, como los repositorios institucionales o las revistas digitales de acceso abierto (Castañeda et al., 2022). En esa línea, la alfabetización digital no solo representa una herramienta para el aprendizaje, sino también un recurso estratégico para promover la producción de conocimiento y el compromiso con la investigación desde etapas tempranas de la formación universitaria interdisciplinaria.

Por ello, resulta pertinente y necesario analizar cómo se relacionan la alfabetización digital y la actitud hacia la investigación en los estudiantes de educación superior, en el marco de una sociedad cada vez más orientada a la información y el conocimiento. Explorar esta relación permitirá comprender en qué medida el dominio de las tecnologías digitales puede influir en la motivación, disposición y participación activa de los estudiantes en procesos investigativos. Además, brindará insumos valiosos para el diseño de estrategias pedagógicas

que integren el desarrollo digital con la promoción de una cultura investigativa más sólida, crítica y comprometida con la transformación social, equitativa y sostenible.

El presente estudio tiene como propósito fundamental determinar la influencia de la alfabetización digital en la actitud hacia la investigación en estudiantes universitarios, considerando que el fortalecimiento de ambas dimensiones puede contribuir significativamente al desarrollo académico, científico y profesional de los futuros egresados. Esta investigación se inscribe en un contexto educativo que exige una renovación constante de los enfoques pedagógicos, donde el uso reflexivo y ético de la tecnología, articulado con una disposición favorable hacia la indagación y la generación de conocimiento, constituye una piedra angular para el fortalecimiento de una educación superior inclusiva y de calidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, transversal y explicativo de tipo causal, ya que buscó determinar la influencia de la alfabetización digital sobre la actitud hacia la investigación. Esta elección metodológica se justifica por el propósito de analizar la relación causa-efecto sin manipulación intencional, observando los fenómenos en su contexto natural, y permitiendo identificar patrones de comportamiento, niveles de asociación estadística, regularidades en los datos y tendencias emergentes con base empírica sólida y verificable (Creswell & Creswell, 2023).

La población de estudio estuvo constituida por estudiantes universitarios matriculados en asignaturas con componentes investigativos, de los cuales se seleccionó una muestra no probabilística de tipo intencional conformada por 55 estudiantes. Se eligió esta muestra considerando criterios de accesibilidad, voluntariedad y adecuación al fenómeno investigado. Los participantes brindaron su consentimiento informado, y se garantizó el cumplimiento de los principios éticos establecidos por la Declaración de Helsinki (World Medical Association, 2023), resguardando la confidencialidad, la integridad y la autonomía de todos los participantes de este estudio durante todo el proceso de desarrollo del estudio.

Para la recolección de datos se empleó la técnica de encuesta, aplicada mediante un cuestionario estructurado validado por juicio de expertos, diseñado con escalas ordinales de medición. Este instrumento se dividió en dos secciones correspondientes a las variables

centrales del estudio: La primera sección evaluó la alfabetización digital, operacionalizada en tres dimensiones: (a) búsqueda de información en bases científicas, (b) uso de gestores bibliográficos y (c) procesamiento de datos e información, cuyos niveles se agruparon en bajo, medio y alto. En la segunda sección midió la actitud hacia la investigación, considerando tres dimensiones: (a) desarrollo de trabajos académicos, (b) originalidad y relevancia de la investigación y (c) praxis ética investigativa.

Los datos fueron procesados utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 26. Para determinar la influencia de la alfabetización digital sobre la actitud hacia la investigación, se aplicó una regresión logística ordinal, dado que la variable dependiente se categorizó en niveles ordenados: actitud baja, actitud moderada y actitud alta. Esta técnica estadística es adecuada cuando se busca estimar el efecto de predictores cuantitativos o cualitativos sobre una variable ordinal, permitiendo calcular las probabilidades acumuladas de pertenecer a categorías superiores del resultado (Menard, 2022).

La calidad del ajuste del modelo se evaluó mediante el Pseudo R^2 de Nagelkerke, valor que indica la proporción de varianza explicada por los predictores. Se verificaron además los supuestos de multicolinealidad y ajuste lineal del modelo, garantizando la validez estadística de las inferencias obtenidas en esta investigación cuantitativa aplicada. Asimismo, se consideraron los residuos estandarizados, la verificación de independencia de errores y la distribución de las probabilidades acumuladas, permitiendo un análisis inferencial robusto.

RESULTADOS

La presente sección expone los hallazgos obtenidos tras el análisis descriptivo e inferencial de los datos recopilados, acerca de la influencia de la alfabetización digital en la actitud hacia la investigación. Esta etapa se estructuró en función de los niveles de alfabetización digital y actitud hacia la investigación, desagregados en sus respectivas dimensiones. El análisis cuantitativo fue llevado a cabo mediante regresión logística ordinal, permitiendo identificar la influencia estadísticamente significativa de la variable predictora sobre cada una de las dimensiones evaluadas. Los hallazgos son expuestos de forma organizada, sin interpretación, con el propósito de brindar una visión objetiva del comportamiento de las variables observadas con el procedimiento metodológico adecuado.

Este abordaje permitió garantizar la consistencia entre los objetivos de investigación y las técnicas empleadas. A su vez, se procuró presentar los resultados de manera clara y coherente, priorizando la precisión estadística y la integridad científica del análisis.

Tabla 1

Niveles de la alfabetización digital y sus dimensiones

Niveles	Alfabetización digital		Búsqueda de información en base científicas		Uso de gestores bibliográficos		Procesamiento de datos e información	
	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)
Bajo	14	25,0	12	22,5	14	25,0	12	22,5
Medio	19	35,0	19	35,0	19	35,0	22	40,0
Alto	22	40,0	24	42,5	22	40,0	21	37,5
Total	55	100,0	55	100,0	55	100,0	55	100,0

Los datos obtenidos muestran una distribución diferenciada en los niveles de alfabetización digital de los estudiantes evaluados. El 40,0% de los participantes se ubicaron en un nivel alto, mientras que el 35,0% alcanzaron un nivel medio y el 25,0% presentaron un nivel bajo. En términos específicos, la búsqueda de información en bases científicas evidenció el mayor porcentaje en el nivel alto (42,5%), seguida del nivel medio (35,0%) y bajo (22,5%), lo que indica una tendencia favorable en el acceso y uso de fuentes académicas formales. En cuanto al uso de gestores bibliográficos, un 40,0% de los estudiantes se situó en el nivel alto, coincidiendo con el mismo porcentaje observado en la dimensión general de alfabetización digital, lo que sugiere una apropiación creciente de herramientas digitales para la organización de fuentes. Por otro lado, el procesamiento de datos e información mostró una ligera concentración en el nivel medio (40,0%), seguido del alto (37,5%) y finalmente del bajo (22,5%), lo que podría reflejar un área en desarrollo dentro de las competencias

tecnológicas de los estudiantes. Estos resultados permiten identificar fortalezas en el manejo de información académica, así como aspectos susceptibles de ser reforzados.

Tabla 2

Niveles de la actitud hacia la investigación y sus dimensiones

Niveles	Actitud hacia la investigación		Desarrollo de trabajos académicos		Originalidad y relevancia de la investigación		Praxis ética investigativa	
	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)
Bajo	0	0,0	1	2,5	0	0,0	12	22,5
Medio	26	47,5	21	37,5	30	55,0	4	7,5
Alto	29	52,5	33	60,0	25	45,0	39	70,0
Total	55	100,0	55	100,0	55	100,0	55	100,0

De manera general, el 52,5% de los estudiantes manifestaron una actitud alta hacia la investigación, mientras que el 47,5% se posicionaron en el nivel medio; ningún estudiante fue clasificado en el nivel bajo, lo que denota una disposición favorable hacia las prácticas investigativas. En la dimensión “desarrollo de trabajos académicos”, el nivel alto alcanzó un 60,0%, seguido por el nivel medio con 37,5% y un mínimo porcentaje en el nivel bajo (2,5%). La dimensión “originalidad y relevancia de la investigación” mostró una mayor proporción en el nivel medio (55,0%) frente al alto (45,0%), lo que indica una percepción intermedia respecto a la capacidad de generar aportes novedosos en sus trabajos. Por último, la dimensión “praxis ética investigativa” obtuvo los resultados más destacados, con un 70,0% de los estudiantes en el nivel alto, el 7,5% en el nivel medio y un 22,5% en el nivel bajo, reflejando una mayor conciencia sobre los principios éticos que rigen el quehacer científico. Esta distribución permite observar un perfil estudiantil con actitudes marcadamente favorables hacia la investigación. Se identifica, además, un margen de mejora en la dimensión de originalidad, donde los porcentajes indican una autopercepción más moderada.

Tabla 3*Síntesis de los resultados inferenciales de las pruebas de hipótesis*

Hipótesis	Variables	Logaritmo verosimilitud -2	Chi cuadrado	Sig. bilateral	Bondad de ajuste (Significatividad)	Pseudo R Nagelkerke	Influencia x 100%
Hip. Gral.	La alfabetización digital en la actitud hacia la investigación	36,600	34,100	0,000.	1,000	,770	77,0%
Hip. Esp. 1	La alfabetización digital en el desarrollo de trabajos académicos	31,400	29,300	0,000.	1,000	,720	72,0%
Hip. Esp. 2	La alfabetización digital en la originalidad y relevancia de la investigación	42,100	39,000	0,000.	1,000	,810	81,0%
Hip. Esp. 3	La alfabetización digital en la praxis ética investigativa	45,200	40,500	0,000.	1,000	,830	83,0%

El análisis estadístico realizado mediante regresión logística ordinal permitió establecer la influencia de la alfabetización digital sobre la actitud hacia la investigación. Los resultados generales mostraron un nivel significativo de influencia ($p = 0,000$), con una estadística de Chi-cuadrado de 34,100 y una bondad de ajuste óptima (Pseudo R^2 de Nagelkerke = 0,770), lo que representa una influencia del 77,0% en la variable dependiente. En cuanto a las hipótesis específicas, la alfabetización digital influyó en el desarrollo de trabajos académicos con un 72,0% de varianza explicada (Pseudo $R^2 = 0,720$), evidenciando que las habilidades digitales potencian la elaboración académica. En la dimensión de originalidad y relevancia, la influencia fue del 81,0% (Pseudo $R^2 = 0,810$), demostrando una asociación sólida entre la competencia digital y la capacidad creativa investigativa. Finalmente, la mayor influencia se registró en la praxis ética investigativa, con un 83,0% (Pseudo $R^2 = 0,830$), lo que indica que los estudiantes con mayor alfabetización digital muestran una mayor interiorización de principios éticos aplicables al estudio.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los hallazgos del presente estudio evidencian una influencia significativa de la alfabetización digital sobre la actitud hacia la investigación en estudiantes universitarios, lo que confirma que las competencias digitales no sólo facilitan el acceso a fuentes de información, sino que también inciden directamente en la calidad del desempeño investigativo, y en la capacidad crítica, reflexiva, creativa y ética en contextos académicos. Esta conclusión se alinea con lo planteado por Cabero-Almenara et al. (2022), quienes sostienen que la competencia digital constituye un factor predictor del éxito académico en tareas que implican análisis y gestión de datos en el estudiante universitario.

Uno de los aspectos más destacables fue la predominancia de niveles altos en la búsqueda de información científica y en el uso de gestores bibliográficos, lo que sugiere una apropiación progresiva de herramientas digitales para fines académicos. Esto concuerda con los hallazgos de Quispe & Vislao (2022) y Torres et al. (2024), quienes argumentan que el desarrollo de habilidades digitales se vio acelerado por los contextos de virtualidad, reforzando su papel como competencia transversal en la educación superior, y consolidándose como un elemento clave para el aprendizaje autónomo, la producción de conocimiento y el desarrollo de proyectos con un gran impacto científico y social.

En cuanto a la actitud hacia la investigación, se observó un perfil estudiantil marcadamente favorable, especialmente en lo referente a la praxis ética investigativa. En esa línea, Estrada et al. (2021) y Aldana et al. (2020) coinciden en señalar que la formación ética es un componente crucial de la actitud investigativa, puesto que fomenta una práctica científica responsable, consciente y crítica. Asimismo, fortalece la integridad académica y el compromiso social del estudiante investigador. Sin embargo, la dimensión de originalidad y relevancia mostró resultados intermedios, lo que podría reflejar limitaciones en la aplicación práctica de enfoques innovadores, situación que concuerda con Butt & Shams (2020).

Desde el análisis inferencial, se comprobó que la alfabetización digital influye estadísticamente en todas las dimensiones de la actitud investigativa, con énfasis particular en la praxis ética. Este resultado es coherente con los planteamientos de Getenet et al. (2024), quienes destacaron que la confianza digital y la autoeficacia tecnológica mejoran el

compromiso académico y la responsabilidad en los entornos digitales. A su vez, Subaveerapandiyán & Sinha (2022) subrayan que los hábitos de lectura crítica y la habilidad de navegar fuentes confiables en línea impactan directamente en la forma en que los estudiantes abordan y valoran los procesos de investigación superior.

En síntesis, se evidencia que la alfabetización digital constituye un factor determinante en la configuración de una actitud favorable hacia la investigación en el ámbito universitario. Desde una perspectiva global, se confirma que el desarrollo de competencias digitales va más allá del uso instrumental de tecnologías, configurándose como un componente estratégico que fortalece la autonomía académica, la ética investigativa y la producción de conocimiento. Por tanto, la influencia estadísticamente significativa hallada mediante regresión logística ordinal confirma que la alfabetización digital no solo favorece el acceso a la información, sino que también potencia actitudes reflexivas, críticas y responsables en el quehacer investigativo. Tal impacto fue especialmente notorio en la praxis ética, lo que sugiere que el uso consciente y competente de recursos digitales también está vinculado con valores fundamentales del trabajo académico.

No obstante, se identifican limitaciones metodológicas que deben considerarse en futuras investigaciones. La muestra estuvo circunscrita a un contexto institucional específico, lo cual podría afectar la generalización de los resultados. Asimismo, el enfoque cuantitativo impidió explorar en profundidad las motivaciones individuales y las barreras subjetivas en el desarrollo de competencias investigativas del estudiante de educación superior. En consecuencia, se recomienda ampliar el alcance del estudio hacia una perspectiva mixta o cualitativa, incorporando entrevistas o grupos focales que permitan interpretar el significado que los estudiantes atribuyen a la investigación. Además, sería valioso analizar el papel de variables intermedias como la motivación intrínseca o el apoyo institucional.

En suma, promover la alfabetización digital en contextos educativos debe concebirse como una política formativa prioritaria, que prepare técnicamente al estudiante, y que lo empodere como agente activo de producción ética y rigurosa del conocimiento científico. Esta formación debe estar orientada no solo al dominio de herramientas tecnológicas, sino también al desarrollo del pensamiento crítico, la evaluación de fuentes confiables y la responsabilidad en el uso de la información. De este modo, se favorece una

cultura investigativa sólida, autónoma, colaborativa, sostenible, innovadora, reflexiva, multidisciplinaria, inclusiva y socialmente pertinente en el ámbito universitario y profesional.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alcántara-Pilar, J. M., Ruiz-Palomino, P., & Bleakley, C. M. (2024). *The role of universities in enabling open innovation through the development of digital competence of faculty*. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(4), 100409. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100409>
- Aldana, G.M., Babativa, D.A., Caraballo, G.J., & Rey, C.A. (2020). Scale of attitudes towards research (EACIN): evaluation of its psychometric properties in a Colombian sample. *Revista CES Psicología*, 13, 89–103. <https://doi.org/10.21615/cesp.13.1.6>
- Alvarado, M., Espinoza, D., & Chávez, A. (2021). Actitudes hacia la investigación en estudiantes universitarios de ciencias sociales. *Revista Conrado*, 17(81), 164–173.
- Butt, I.H., & Shams, J.A. (2020). Máster in education student attitudes towards research: a comparison between two public sector universities in Punjab. *South Asian Studies*, 28(1), 97–105.
- Cabero-Almenara, J., Gutiérrez-Castillo, J. J., Guillén-Gámez, F. D., & Gaete-Bravo, A. F. (2022). Digital competence of higher education students as a predictor of academic success. *Technology, Knowledge and Learning*, 28(2), 683–702. <https://doi.org/10.1007/s10758-022-09624-8>
- Cabero-Almenara, J., Gutiérrez-Castillo, J. J., Guillén-Gámez, F. D., & Gaete-Bravo, A. F. (2022). Digital competence of higher education students as a predictor of academic success. *Technology, Knowledge and Learning*, 28(2), 683–702. <https://doi.org/10.1007/s10758-022-09624-8>
- Castañeda, L., Esteve, F. M., & Adell, J. (2022). ¿Estamos preparados para la educación postdigital? Una mirada desde las competencias digitales del profesorado. *Educación XX1*, 25(1), 35–58. <https://doi.org/10.5944/educxx1.28713>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). Sage Publications.
- Esteve, F. M., Adell, J., & Gisbert, M. (2020). El desarrollo de la competencia digital docente: Una necesidad del siglo XXI. RIED. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 23(2), 9–27. <https://doi.org/10.5944/ried.23.2.26540>

- Estrada, A.E.G., Córdova, A.F.E., Gallegos, R.N.A., & Mamani, U.H.J. (2021). Attitude towards scientific research in Peruvian students of pedagogical higher education. *Apuntes Universitarios*, 11, 60–72. <https://doi.org/10.17162/au.v11i3.691>
- Getenet, S. T., Campbell, C., & Bull, D. (2024). Exploring first-year university students' digital literacy, attitudes towards technology, and self-efficacy in using digital tools for learning. *Australasian Journal of Educational Technology*, 40(1), 24–38. <https://doi.org/10.14742/ajet.8404>
- Getenet, S.T., Cattle, R., Redmond, P., & Albion, P. (2024). Students' digital technology attitude, literacy and self-efficacy and their effect on online learning engagement. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 21, 3-10. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00437-y>
- Gonzales, M., Ramírez, L., & Villanueva, D. (2023). Barreras y actitudes hacia la investigación en estudiantes de educación superior: una revisión sistemática. *Revista Científica de Educación Superior*, 18(3), 42–57.
- Lee, M., & Lee, J. (2021). Exploring digital literacy competence and its relationship with academic self-efficacy and intention to use digital tools for learning: A comparative study of Korean and Finnish students. *Education and Information Technologies*, 26(6), 7065–7083. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10593-3>
- Lopez-Nuñez, J.-A., Alonso-García, S., Berral-Ortiz, B., & Victoria-Maldonado, J.-J. (2024). A Systematic Review of Digital Competence Evaluation in Higher Education. *Education Sciences*, 14(11), 1181. <https://doi.org/10.3390/educsci14111181>
- Menard, S. (2022). *Applied logistic regression analysis* (3rd ed.). SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781071802729>
- Ng, W. (2021). *New digital literacies: A framework for digital literacy development in higher education*. Springer.
- Quispe, G. del P., & Vislao, R. G. (2022). Alfabetización digital: conocimiento indispensable para la labor docente durante la pandemia. *Horizontes. Revista De Investigación En Ciencias De La Educación*, 6(25), 1606–1614. <https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v6i25.439>

- Rodríguez-Gómez, D., & Gairín, J. (2020). La actitud hacia la investigación en los estudiantes universitarios. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 11(31), 3–20. <https://doi.org/10.22201/iissue.20072872e.2020.31.582>
- Şahin, F., Çevik, M., & Kuzu, A. (2023). Digital literacy, technological literacy, and internet literacy as predictors of attitude toward applying computer-supported education. *Education and Information Technologies. Education and Information Technologies*, 28(8), 9885–9911. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11311-1>
- Selfa-Sastre, M., Pifarré, M., Cujba, A., Cutillas, L., & Falguera, E. (2022). *The role of digital technologies to promote collaborative creativity in language education. Frontiers in Psychology*, 13, 828981. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.828981>
- Subaveerapandiyam, A., & Sinha, P. (2022). Digital literacy and reading habits of the Central University of Tamil Nadu students: A survey study. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.03330>
- Torres, A., Espinoza, G. R., Zuloaga, P. R., & Rimascca, I. K. (2024). Alfabetización digital en docentes de educación superior. *Revista InveCom*, 4(2), e040264. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10714274>
- World Medical Association. (2023). *WMA Declaration of Helsinki – Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects*. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>

MÁS ALLÁ DE LA CONECTIVIDAD: DESARROLLANDO LA ALFABETIZACIÓN DIGITAL CON COMUNIDADES DE APRENDIZAJE EN LÍNEA⁸

BEYOND CONNECTIVITY: DEVELOPING DIGITAL LITERACY WITH ONLINE LEARNING COMMUNITIES

Susy Karina Dávila Panduro⁹

Linda Priscilla López Alvarado¹⁰

Rommel Erwin Quintanilla Huamán¹¹

Lita Macedo Torres¹²

Rafael Vásquez Alegría¹³

23

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES¹⁴

⁸ Resultados del proyecto de investigación: Efectividad de las comunidades de aprendizaje en línea en la alfabetización digital. Ejecutado en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, con Resolución Rectoral N° 0696-2025-UNAP.

⁹ Doctora en Educación, Docente en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, correo electrónico: susy.davila@unapiquitos.edu.pe

¹⁰ Doctora en Educación, Docente en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, correo electrónico: linda.lopez@unapiquitos.edu.pe

¹¹ Doctor en Educación, Docente en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, correo electrónico: rommel.quintanilla@unapiquitos.edu.pe

¹² Magister en Docencia e Investigación Universitaria, Docente en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, correo electrónico: lita.macedo@unapiquitos.edu.pe

¹³ Magister en Docencia Universitaria, Docente en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, correo electrónico: rafael.vasquez@unapiquitos.edu.pe

¹⁴ Pares Evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

El presente estudio evaluó la eficacia del uso de las comunidades de aprendizaje en línea en la mejora de la alfabetización digital, la investigación tuvo un enfoque cuantitativo y contó con la participación de 415 estudiantes universitarios de educación en la ciudad de Iquitos. Para medir el impacto de la comunidad de aprendizaje en línea, se utilizó la encuesta mediante un cuestionario estructurado, siendo utilizado antes y después de la aplicación del tratamiento, estos instrumentos fueron validados y sometidos a una prueba piloto para verificar su confiabilidad, lo cual permitió identificar las diferencias significativas entre los resultados del pre-test y post-test en lo que respecta a la alfabetización digital. Los resultados, analizados mediante la prueba estadística de rangos con signo de Wilcoxon que dio un nivel de significancia menor al 0,05, confirmaron que el uso de las comunidades de aprendizaje en línea tuvo un efecto positivo en la alfabetización digital en los estudiantes universitarios. Por lo que, con estos hallazgos, se concluye que el uso de comunidades de aprendizaje en línea constituye una herramienta tecnológica efectiva para mejorar la alfabetización digital en los estudiantes universitarios. Por lo que con un 95% de confianza, se puede afirmar que su implementación tiene un impacto significativo en el desarrollo de esta habilidad. Estos resultados confirman que este tipo de estrategia de aprendizaje es útil para el desarrollo integral de los estudiantes universitarios que viven una necesidad de conexión tecnológica a nivel mundial.

PALABRAS CLAVE: Comunidades de aprendizaje, alfabetización digital, Internet, Aprendizaje en línea.

ABSTRACT

This study evaluated the effectiveness of the use of online learning communities in improving digital literacy. The research had a quantitative approach and involved the participation of 415 university students of education in the city of Iquitos. To measure the impact of the online learning community, the survey was used through a structured questionnaire, being used before and after the application of the treatment, these instruments were validated and subjected to a pilot test to verify its reliability, which allowed identifying significant differences between the results of the pre-test and post-test in terms of digital literacy. The results, analyzed using the Wilcoxon signed-rank statistical test that gave a significance level of less than 0.05, confirmed that the use of online learning communities had a positive effect on digital literacy in university students. Therefore, with these findings, it is concluded that the use of online learning communities constitutes as a technological tool in the improvement of effective digital literacy in university students. Therefore, with 95% confidence, it can be affirmed that its implementation has a significant impact on the development of this skill. These results confirm that this type of learning strategy is useful for the integral development of university students who live in need of technological connection worldwide.

Keywords: Learning communities, digital literacy, Internet, online learning.

INTRODUCCIÓN

El uso masivo contemporáneo de tecnologías de la información y la comunicación ha transformado la educación a escala planetaria. Una clase ya no necesita limitarse a un aula física; puede desarrollarse, con igual naturalidad, entre regiones distantes que se conectan mediante un computador o un teléfono inteligente. La digitalización ha puesto cero barreras temporales y geográficas, permitiendo ambientes de enseñanza más flexibles, ágiles y distribuidos. Este giro no se reduce, empero, a reemplazar lápiz y cuaderno por pantalla, sino que invita a repensar cómo cada uno busca datos, dialoga y finalmente articula el sentido de lo aprendido en colectivo. En este movimiento de innovación continua, dos conceptos surgen como pilares que cualquier currículo moderno debe proteger: comunidades de aprendizaje en línea y alfabetización digital. Aunque emergen de contextos distintos, confluyen en un mismo propósito: dotar a alumnos y futuros mentores de la destreza y el juicio que se requieren para navegar un horizonte digital en constante metamorfosis. (Reyes & Avello, 2021).

Hoy por hoy, movernos, entender, crear y aportar de forma valiosa en Internet se equipará en importancia a saber leer y escribir, y el uso consciente de redes tecnológicas en grupo potencia el aprendizaje social y la construcción colectiva del saber. En este capítulo de libro examinaremos esa intersección, preguntándonos no solo en qué medida la alfabetización digital abre las puertas a comunidades de estudio en línea, sino cómo, a su vez, esas mismas comunidades la cultivan y robustecen mediante la interacción y la colaboración diaria que fomentan. Las comunidades de aprendizaje, en sentido amplio, son grupos de personas que comparten intereses, metas o problemas y aprenden unas de otras mediante el diálogo y el intercambio continuo, que busca equilibrar las esencias social, cognitiva y docente, la esencia permanece inalterada: el conocimiento se construye socialmente (Pérez et al., 2022).

La expansión de las tecnologías digitales y las redes sociales ha permitido que grupos antes condenados a un mismo calendario y un mismo salón se encuentren sin horarios fijos y sin fronteras físicas, dando lugar a lo que ahora se llama "comunidad de aprendizaje en línea" (CAL). Así una CAL no es simplemente una lista de contactos iluminados por una

pantalla, sino una estructura, pactada o espontánea, en la que la mediación técnica convierte las opiniones en preguntas, los problemas en soluciones entregadas en conjunto y el anonimato temporal en respaldo personal. Pueden aparecer como foros que se contestan días después, páginas compartidas que cualquiera puede editar, aulas virtuales, redes profesionales que ofrecen múltiples rutas al mismo contenido. Su verdadera fuerza educativa no proviene del acceso a archivos, sino de un giro brillante: pasan de la charla unidireccional del profesor al aprendizaje constructivista, donde la discrepancia, la discusión y el matiz se convierten en materia prima. En ese juego dialogante el estudiante deja el pupitre pasivo, interviene con su visión, provoca dudas y al final vuelve a mirar su propio saber con ojos más críticos, mejores habilidades comunicativas y la disposición necesaria para trabajar con otros, aunque les separe un continente (Villegas, 2023).

La eficacia de un aula virtual, sin embargo, no radica solo en tener la tecnología a mano, sino en lo bien que se comunican sus miembros, en cómo se anima a cada persona a participar y en la claridad con que el docente traza los objetivos de cada actividad. Cuando allí se cultiva un clima de pertenencia, confianza mutua y meta común, la simple lista de contactos se convierte en una comunidad de aprendizaje auténtica, donde el apoyo entre compañeros y la retroalimentación útil son piezas claves para el avance tanto de cada estudiante como del grupo en su conjunto (Tello & Paredes, 2022).

La alfabetización digital, que algunas veces se llama e-literacy o competencias digitales, abarca el conjunto de saberes, habilidades y actitudes que permiten a las personas usar dispositivos y recursos tecnológicos de forma eficaz, crítica y segura en ámbitos personales, académicos y laborales. Lejos de ser un saber unitario, ese dominio es ahora un fenómeno múltiple y en movimiento, que ha cambiado mucho desde que se pensaba solo en encender un ordenador o abrir una página web. Al principio, la idea se reducía a manejar teclados, ratones y navegadores. Hoy, la noción suma aspectos más profundos. No basta con saber "cómo" se hace algo; hay que discernir "cuándo" es útil y "por qué" añade valor, además de medir los efectos éticos, sociales o culturales de cada decisión tecnológica. Una persona realmente alfabetizada en lo digital localiza, evalúa, organiza y produce información con herramientas en línea, se comunica y colabora en redes, cuida su privacidad y seguridad en

la red, y aporta de forma responsable y crítica al debate público que esas mismas redes alimentan (Parra et al., 2022).

La alfabetización digital abarca mucho más que abrir un navegador: incluye evaluar la fiabilidad de una página, proteger la propia identidad, resolver pequeños problemas técnicos y adaptarse a herramientas que aparecen casi cada semana. Por eso, se considera una meta-habilidad que da a las personas el poder de seguir aprendiendo y de tomar parte activa en la sociedad basada en el conocimiento. En el aula, esta competencia no es un extra, sino un requisito básico que recorre todas las materias. Permite a los alumnos encontrar materiales en línea, usar aplicaciones mientras hacen un trabajo e, incluso, entrenarse para el tipo de empleo que esperan tener cuando terminen. Para quienes estudian pedagogía, la presión es mayor: ellos deben manejar la tecnología para crecer como profesionales y, al mismo tiempo, mostrar a sus futuros estudiantes cómo usarla con sentido. La brecha digital ya no se mide solo con cables y Wi-Fi; se mide con la capacidad de transformar una pantalla en una herramienta que realmente cambie la forma de aprender y vivir (Asencio et al., 2021).

28

La alfabetización digital y las comunidades de aprendizaje en línea forman un circuito en el que cada elemento alimenta al otro. No es que las destrezas técnicas sean solo el pasaporte para entrar a una CAL, sino que el acto mismo de colaborar en ese espacio empuja al alumno a articular y expandir esas competencias. Para integrarse de manera efectiva, el estudiante necesita unas habilidades básicas: manejar plataformas de chat, usar calendarios compartidos y cuidar su reputación digital. Sin ese piso mínimo, su experiencia puede ser corta, frustrante o hasta perjudicial. La verdadera ganancia llega, sin embargo, cuando deja de usar la tecnología de forma mecánica. Al trabajar juntos en un proyecto, argumentar en un foro, redactar un documento colaborativo o brindar una crítica amable, el miembro de la comunidad aprende en tiempo real y con un objetivo claro. Es en tales momentos que la alfabetización digital se convierte en una herramienta viva y sensata (Sisalima et al., 2025).

Los participantes aprenden a evaluar de forma crítica la información que otros comparten, a expresar sus ideas de manera clara y breve en espacios digitales, a solucionar problemas técnicos que aparecen durante el trabajo conjunto y a ponerse al día con nuevas

herramientas que el grupo adopta. Esta estructura social y colaborativa que caracteriza a las comunidades de aprendizaje en línea (CAL) sirve de andamiaje natural en la formación de la alfabetización digital. Los compañeros ofrecen ayuda inmediata y ejemplifican prácticas digitales efectivas, mientras que un facilitador experto orienta la adquisición de habilidades más complejas. Además, tener que negociar significados, gestionar desacuerdos y construir consenso en un espacio virtual empuja a todos a perfeccionar su comunicación digital y a entrenar el pensamiento crítico. Por lo tanto, las CAL no son simplemente lugares donde se aplica lo que ya se sabe sobre tecnología, sino auténticos laboratorios donde esas competencias se cultivan se ponen a prueba y se expanden de forma orgánica. Al involucrarse en una red así, la alfabetización digital deja de ser un conjunto aislado de destrezas para convertirse en una práctica social contextualizada que se refuerza mutuamente entre los miembros (Erraez et al., 2025).

Pereles y otros en el año 2024, indicaron, antes de que el mundo digital fuese realmente ubicuo, muchas de sus ideas siguen siendo valiosas para analizar los entornos de aprendizaje en línea de hoy. Ellos caracterizan a una comunidad de práctica como un conjunto de personas que se preocupan por un mismo asunto, intercambian asuntos sobre él y, al hacerlo, afinan su saber y su pericia. Para que ese aprendizaje colectivo funcione, los integrantes deben sentir que comparten un dominio -una identidad-, cultivar relaciones donde se enseñen y aprendan mutuamente, y mantener un repertorio de recursos, herramientas y rutinas que llamaron la práctica (Pereles et al., 2024).

Por otro lado, Ponce en el 2025, describe que la Comunidad de Aprendizaje en Línea (CAL), y la alfabetización digital actúa como puerta de entrada, y al mismo tiempo, su ejercicio constante refina esa misma alfabetización: los estudiantes deben manejar las herramientas no de forma mecánica, sino para conversar, colaborar y co-crear. La teoría de la práctica comunitaria de Wenger sirve como marco valioso para vigilar este proceso, ya que muestra cómo los recién llegados absorben destrezas observando a los más veteranos, mientras que todos, a su vez, alimentan el acervo colectivo de saberes y prácticas (Ponce, 2025).

George en el 2023, figura troncal del conectivismo, ha sostenido que aprender en el mundo digital pasa menos por memorizar datos y más por trazar y nutrir redes de información y personas. Para él, el conocimiento no habita en un libro o un auricular, sino en las conexiones que se tejen entre nodos, y aprender es exactamente ir armando, explorando y reorganizando esas redes. Esta idea entrelaza de manera natural la alfabetización digital con las CAL: quien quiere saber debe primero saber conectar, para el autor, la alfabetización digital ya no es solo habilidades, sino la base sobre la que una persona gestiona el conocimiento en un mundo disperso y cambiante. Los principios del conectivismo - autonomía, diversidad de voces, y la capacidad de ver enlaces entre disciplinas - son impulsados y ampliados por esa alfabetización. En esa línea las comunidades de aprendizaje en línea son redes tangibles donde nodos - individuos, recursos, herramientas - se enlazan para crear nuevo saber. Participar a ese nivel pide habilidades digitales avanzadas que permitan no solo consumir información, sino curarla, evaluarla, aportar y colaborar en redes significativas. Por todo eso el autor insiste en que saber conectarse y navegar el torrente de datos es una forma crítica de alfabetización para seguir aprendiendo durante todo el siglo XXI (George, 2023).

30

Viteri y otros en el 2025, propone un marco pedagógico y holístico. Según los autores, la alfabetización digital no es una destreza aislada, sino un conjunto de competencias interrelacionadas: cultural (entender el impacto de la tecnología en la cultura), cognitiva (pensar usando la tecnología), constructiva (crear contenido digital), comunicativa (interactuar en línea), confiable (evaluar la credibilidad de la información), creativa (innovar con herramientas digitales), crítica (cuestionar y analizar datos) y cívica (participar responsablemente en el espacio digital). Esta perspectiva multidimensional resulta crucial para comunidades que aprenden y colaboran en entornos en línea (Viteri et al., 2025).

Es por ello que la alfabetización digital y las comunidades de aprendizaje en línea no son fenómenos aislados, sino componentes interdependientes de un ecosistema educativo en evolución. La alfabetización digital da a las personas las herramientas técnicas necesarias para moverse en línea, pero son las comunidades de aprendizaje en línea las que crean el espacio social y educativo donde esas herramientas se usan, se discuten y se mejoran juntos.

Para los futuros docentes, esa combinación es clave porque, al aprender en red, entienden cómo seguir formándose ellos mismos y cómo ayudar a las generaciones próximas a navegar un mundo donde saber colaborar en línea vale tanto como leer o hacer tareas clásicas (Argudo & Ortega, 2022).

MATERIAL Y MÉTODOS

La investigación tuvo un corte experimental-cuatitativo, utilizando un diseño de pre-experimento, que analizó el impacto de la comunidad de aprendizaje en línea en la mejora de la alfabetización digital con estudiantes de la carrera de Educación, en una universidad nacional en la amazonia del Perú.

La muestra en estudio estuvo formada por un grupo de 415 estudiantes, aplicando un pre-test y un post-test (Hernandez et al., 2010), para identificar la variación en el conocimiento de la informática educativa, es decir la alfabetización digital. Se trabajó mediante la encuesta, como técnica y se aplicaron dos cuestionarios estructurados para obtener la información del estudio.

Para poder tener la garantía de los resultados, estos instrumentos fueron sometidos a validación a través del juicio de expertos y con una prueba piloto, se verificó su confiabilidad aplicando el coeficiente de alfa de Cronbach.

El análisis y procesamiento de los datos, para realizar la prueba de hipótesis se utilizó el programa estadístico SPSS versión 27

RESULTADOS

Tabla 1

Análisis de la Alfabetización digital en el pre-test.

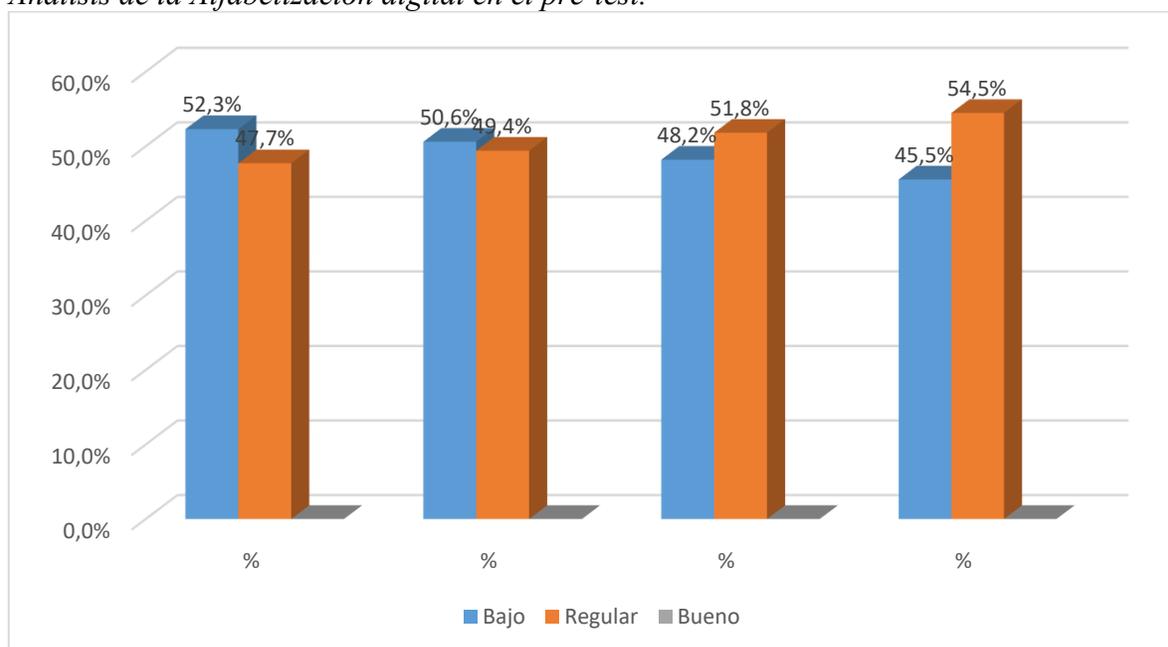
Pre-Test	Dimensiones									Variable	
	Usabilidad y Acceso a la Plataforma		Interacción y Comunicación		La Calidad de los Contenidos y Actividades		Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos		Alfabetización Digital		
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
Bajo	217	52,3%	210	50,6%	200	48,2%	189	45,5%	118	28,4%	
Regular	198	47,7%	205	49,4%	215	51,8%	226	54,5%	297	71,6%	
Bueno	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	
Total	415	100%	415	100%	415	100%	415	100%	415	100%	

Fuente: Elaborado por los autores

32

Figura 1

Análisis de la Alfabetización digital en el pre-test.



Fuente: Tabla 1

En la Tabla 1 se presentan los resultados del Pre-Test aplicado a una muestra de 415 estudiantes, distribuidos en diferentes dimensiones relacionadas con la alfabetización digital y es importante destacar que, en este Pre-Test, ninguna de las dimensiones ni la variable general de Alfabetización Digital registró participantes en el nivel "Bueno". Por otro lado, se tuvo en la dimensión: Usabilidad y Acceso a la Plataforma, que la mayoría de los participantes mostró un desempeño "Bajo", representando el 52,3% (N=217) de la muestra total, el 47,7% restante (N=198) se ubicó en el nivel "Regular". Sobre la dimensión: Interacción y Comunicación los resultados son muy similares al anterior. El 50,6% (N=210) de los participantes se clasificó en el nivel "Bajo" y casi la mitad, el 49,4% (N=205), se encontró en el nivel "Regular", para la dimensión: Calidad de los Contenidos y Actividades: el 48,2% (N=200) de los participantes reportó un nivel "Bajo" y un porcentaje ligeramente mayor, el 51,8% (N=215), se situó en el nivel "Regular", finalmente para la dimensión: Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos: muestra una distribución donde el 45,5% (N=189) de los participantes evaluó un impacto "Bajo" y la mayoría, el 54,5% (N=226), se ubicó en el nivel "Regular". En forma global la Variable: Alfabetización Digital, presentó un porcentaje de 28,4% (N=118), se ubicaron en el nivel "Bajo", y la gran mayoría, el 71,6% (N=297), se clasificó en el nivel "Regular".

Los datos disponibles indican que, aunque la usabilidad, la interacción, la calidad de los contenidos y el impacto reciben críticas diferenciadas, el promedio general de la alfabetización digital de los encuestados se sitúa en una calificación de Regular, y un porcentaje notable permanece en el escalón Bajo. La conclusión que puede extraerse es que los estudiantes dominan tareas electrónicas elementales, pero aún requieren acompañamiento sistemático y recursos más sofisticados para transitar a una competencia Buena, sobre todo en escenarios de aprendizaje completamente virtual.

Es por ello por lo que en el Pre-Test tiene un panorama donde la mayoría del alumnado, antes de cualquier tratamiento formativo, exhibe niveles Regulares de alfabetización digital, aunque una fracción considerable permanece categorizada como Baja. Las dimensiones de usabilidad, interacción, calidad del contenido e impacto presentan

distribuciones similares, es decir, predominan los grados Bajo y Regular y no hay participantes en rango Bueno. Estos resultados recomiendan urgentemente el diseño e implementación de estrategias focalizadas que robustezcan las habilidades digitales y optimicen la experiencia de las comunidades en línea, a fin de elevar la alfabetización digital general y maximizar los beneficios educativos.

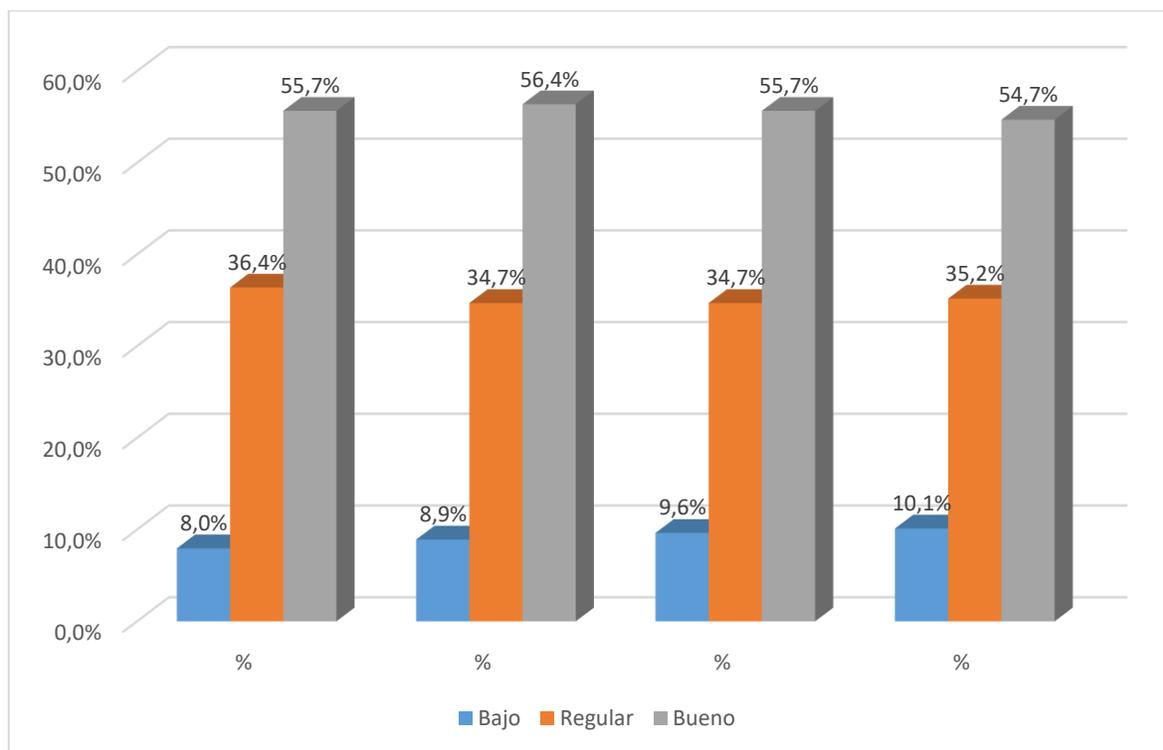
Tabla 2
Análisis de la Alfabetización digital en el post-test.

Post-Test	Dimensiones						Variable			
	Usabilidad y Acceso a la Plataforma		Interacción y Comunicación		La Calidad de los Contenidos y Actividades		Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos		Alfabetización Digital	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Bajo	33	8,0%	37	8,9%	40	9,6%	42	10,1%	0	0,0%
Regular	151	36,4%	144	34,7%	144	34,7%	146	35,2%	153	36,9%
Bueno	231	55,7%	234	56,4%	231	55,7%	227	54,7%	262	63,1%
Total	415	100%	415	100%	415	100%	415	100%	415	100%

Fuente: Elaborado por los autores

Figura 2

Análisis de la Alfabetización digital en el post-test.



Fuente: Tabla 2

En la Tabla 2 se tienen los resultados del Post-Test aplicado a la misma muestra de 415 participantes, después de una intervención o período de aprendizaje. Al igual que en el Pre-Test, los niveles de desempeño se categorizan en "Bajo", "Regular" y "Bueno". Sin embargo, a diferencia del Pre-Test, en este Post-Test se observa una distribución significativa de participantes en el nivel "Bueno" en todas las dimensiones y en la variable general de Alfabetización Digital. Se esta forma en la dimensión: Usabilidad y Acceso a la Plataforma, se observa una mejora sustancial; el porcentaje de participantes en el nivel "Bajo" se redujo drásticamente a solo el 8,0% (N=33), el 36,4% (N=151) de los participantes se ubicó en el nivel "Regular" y lo más significativo es que la mayoría, el 55,7% (N=231), alcanzó el nivel "Bueno". Sobre la dimensión: Interacción y Comunicación, también muestran una mejora considerable, solo el 8,9% (N=37) de los participantes se clasificó en el nivel "Bajo", el 34,7% (N=144) se encontró en el nivel "Regular" y más de la mitad, el 56,4% (N=234), alcanzó el nivel "Bueno". Sobre la dimensión: Calidad de los Contenidos y Actividades, el

porcentaje en el nivel "Bajo" se redujo al 9,6% (N=40), el 34,7% (N=144) se situó en el nivel "Regular" y el 55,7% (N=231) de los participantes alcanzó el nivel "Bueno". Sobre la dimensión: Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos, también refleja una mejora significativa, el porcentaje de participantes en el nivel "Bajo" se redujo al 10,1% (N=42), el 35,2% (N=146) se ubicó en el nivel "Regular" y más de la mitad, el 54,7% (N=227), alcanzó el nivel "Bueno". De esta forma en manera general la Variable: Alfabetización Digital, muestra una mejora excepcional en el Post-Test, donde es notable que ningún participante (0,0%, N=0) se ubicó en el nivel "Bajo", el 36,9% (N=153) de los participantes se clasificó en el nivel "Regular" y la gran mayoría, el 63,1% (N=262), alcanzó el nivel "Bueno".

El juicio sobre la eficacia de la intervención es rotundo: más de dos terceras partes de quienes participaron lograron situarse en el nivel "Bueno" de alfabetización digital, mientras que la categoría "Bajo" desapareció por completo. Tal desempeño sugiere que la formación brindada no solo transfirió conocimientos, sino que también reconfiguró la confianza tecnológica de los alumnos.

Al contemplar el resultado global del Post-Test, la tendencia es contundente: todas las dimensiones y el índice general de Alfabetización Digital mostraron avances amplios y estadísticamente significativos. Las tasas de desempeño "Bajo" se recortaron drásticamente y, de hecho, en la medida global, esa capa mínima fue erradicada. La mayoría migró a la categoría "Bueno", lo que permite concluir que las estrategias diseñadas elevaron las competencias digitales y, a su vez, enriquecieron la experiencia en los entornos de aprendizaje en línea, repercutiendo positivamente en la motivación y el rendimiento académico de los estudiantes.

Tabla 3
Prueba de Rangos con Signo de Wilcoxon.

	Estadísticos de prueba ^a				
	Usabilidad y Acceso a la Plataforma (Post-Test) - Usabilidad y Acceso a la Plataforma (Pre-Test)	Interacción y Comunicación (Post-Test) - Interacción y Comunicación (Pre-Test)	La Calidad de los Contenidos y Actividades (Post-Test) - La Calidad de los Contenidos y Actividades (Pre-Test)	Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos (Post-Test) - Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos (Pre-Test)	Alfabetización Digital (Post-Test) - Alfabetización Digital (Pre-Test)
Z	-15,475 ^b	-15,415 ^b	-14,804 ^b	-14,646 ^b	-16,129 ^b
Sig. asin. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos negativos.

En la Tabla 3 se tienen los resultados de la prueba de hipótesis aplicados a cada una de las dimensiones y a la variable, antes y después del uso de la Comunidad de Aprendizaje en Línea con los estudiantes universitarios de educación, donde se utilizó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, por tratarse de variables de tipo cualitativas ordinales, por lo que se tomó como premisa que tiene distribución libre y no se tuvo a realizar la prueba de normalidad. En cada uno de los resultados se comprobó que la significancia fue menor al 0,05, por lo que se afirma que existe una diferencia significativa entre ambos momentos de la recolección de los datos, de igual forma los valores del estadístico Z, los cuales salieron mayores a 1,96 indican que los resultados son altamente significativos, donde se considera que en el inicio hubo mayormente más estudiantes en nivel bajo y al final este número fue mucho menor; confirmando la hipótesis de la investigación: El uso de las comunidades de aprendizaje en línea mejora la alfabetización digital con estudiantes de educación universitaria en la ciudad de Iquitos en el año 2025.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al comparar los resultados del Pre-Test y del Post-Test, la evidencia muestra no solo un aumento numérico, sino una mejora consistente en todas las dimensiones medidas, incluida la variable general de Alfabetización Digital. Esta trayectoria uniforme sugiere que la estrategia piloteada para elevar las competencias digitales y enriquecer la experiencia de aprendizaje en línea ha sido efectiva. El desplazamiento de una distribución en la que predominaban los niveles Bajo y Regular, hacia una en la que Bueno se convierte en la categoría mayoritaria, habla, en términos prácticos, del impacto tangible de las acciones implementadas.

El cambio más notable se manifiesta precisamente en la variable Alfabetización Digital. En el examen inicial, el 28,4 por ciento del grupo cayó en la categoría "Bajo" y el 71,6 por ciento se situó en "Regular", sin que nadie llegara a "Bueno". Después de la intervención, los resultados del segundo test ofrecen un giro sorprendente: el porcentaje de estudiantes en el nivel "Bajo" se redujo a cero.

El porcentaje de alumnos que antes se encontraba en el nivel "Regular" ha descendido al 36,9 %, mientras que un optimista 63,1 % ha avanzado a la banda "Bueno". Esta mejora sugiere que la acción formativa no solo corrigió fallos, sino que empujó a una parte significativa a dominar habilidades digitales requeridas para un rendimiento superior. Por consiguiente, el resultado avala la eficacia de las estrategias pedagógicas empleadas y confirma que estas pueden reducir la brecha digital, preparando así a los estudiantes para los actuales retos educativos y laborales.

Respecto a la Usabilidad y Acceso a la Plataforma, en el primer examen más de la mitad de los participantes (52,3 %) estaba en la banda "Baja", señal clara de dificultades serias para navegar o acceder a los contenidos. El Post-Test muestra un descenso de 8 puntos porcentuales en la categoría "Bajo", y ahora el 55,7% se clasifica en nivel "Bueno". Esta transformación es crucial porque una plataforma accesible y fácil de usar debe preceder a cualquier participación efectiva en las comunidades de aprendizaje virtual.

La ganancia observada sugiere que los alumnos no solo se familiarizaron con la interfaz, sino que también construyeron la confianza y las habilidades técnicas necesarias para manejar los recursos digitales con soltura.

Sobre la interacción y comunicación en entornos virtuales, la habilidad de vincularse y dialogar con otros constituye el epicentro de toda comunidad de aprendizaje. En el Pre-Test, el 50,6% de los participantes se ubicaba en el nivel Bajo, lo que evidenciaba una carencia notable. En contraste, el Post-Test registra una reducción al 8,9% en ese mismo escalón y un ascenso al 56,4% en la categoría Bueno. Esta evolución sugiere que la intervención impulsó competencias como aportar en foros, editar documentos compartidos y exponer ideas de modo claro en espacios digitales. Progresar en este dominio es clave para cultivar un aprendizaje colaborativo y edificar un conocimiento significativo dentro de comunidades en línea.

En la Calidad de los contenidos y actividades. Esta dimensión abarca tanto la valoración que el estudiante otorga al material como el grado real de interacción que mantiene con él, y los resultados sitúan su evolución en terreno evidente. En los datos del Pre-Test, el 48,2% operaba en el nivel bajo; tras la intervención, sólo el 9,6% permaneció allí, mientras que un 55,7% ahora se ubica en la categoría buena. Esta transformación puede leerse de múltiples modos: una mejora genuina y estructural en el diseño y en la calidad de lo ofrecido, o un aumento paralelo en la alfabetización digital del alumnado, que les permitió navegar, interpretar y valorar los recursos de forma más competente y matizada. Sea cual sea la causa primaria, el efecto agregado sobre la experiencia de aprendizaje resulta netamente positivo.

Finalmente, en la dimensión: Impacto en el Aprendizaje, la Motivación y los Resultados Educativos, estudia cómo los alumnos valoran la nueva estrategia y cómo esta opinión afecta su propio aprendizaje. En el Pre-Test, el 45,5% por ciento se situaba en la categoría Baja y el 54,5% en Regular, lo que apuntaba a un efecto restringido. Tras la intervención, el Post-Test refleja solo un 10,1% bajo y un 54,7% en Bueno, señalando un salto claro en la percepción. Esta respuesta positiva valida la hipótesis de que el aumento de

competencias digitales se tradujo en más interés y en mejores logros en clase. Además, un sentido renovado de capacidad para navegar plataformas y una participación activa en foros online parecen haber alimentado tanto la motivación como los resultados académicos.

Los hallazgos de este análisis indican con claridad que las estrategias dirigidas a potenciar la alfabetización digital, cuando se implementan en comunidades de aprendizaje virtual, producen resultados positivos. La mejora estadísticamente significativa en cada dimensión medida, con un acento particular en la alfabetización digital general, refuerza la utilidad de un modelo docente que combina habilidades digitales con prácticas colaborativas.

Estos resultados convergen con la postura de Pereles y otros (2024), quienes sostienen que aprender surge, en primer lugar, de la participación que alguien mantiene dentro de comunidades sociales. La ganancia observada en la alfabetización digital de los alumnos, sobre todo en tácticas de interacción y comunicación, sugiere que el involucrarse de forma activa en el entorno virtual no solo les permitió operar herramientas que ya conocían, sino también construir competencias nuevas mediante la interacción genuina y la co-construcción de saberes. En la misma línea, los resultados se alinean con la mirada de George Siemens y el conectivismo, que entiende el aprendizaje como la destreza de trazar y moverse a través de redes. La intervención, por tanto, pareció potenciar la capacidad de los estudiantes para conectar, colaborar y manejar el flujo de información dentro de esa comunidad, habilidad nuclear para aprender en la era digital.

La mejora observada en las distintas dimensiones de la alfabetización digital-usabilidad, profundidad del pequeño y sentido de impacto-personal se acoge bien al marco multidimensional propuesto por Ponce (2025). Este enfoque contempla no solo la facultad técnica, sino que demanda que los usuarios se muevan de forma informal, cognitiva, constructiva, comunicativa, fiable, creativa y cívica cuando enfrentan tecnologías. La intervención parece haber tocado cada uno de esos hilos, de modo que, más que manejar aplicaciones, los estudiantes discernen consecuencias éticas, evalúan recursos y participan con mayor crítico sentido. Por último, su capacidad para explorar contenidos y dejar huella

positiva en el aprendizaje anima la idea de cultura participativa de George (2023), donde la gente no consume pasivamente, sino que produce, selecciona y comparte sabiduría.

La presente investigación culmina con la contundente conclusión que los datos recogidos tras la fase de Post-Test ofrecen pruebas convincentes de que el uso de la Comunidad de Aprendizaje en Línea, que combine el fomento de la alfabetización digital con la inclusión activa del aprendizaje virtual, puede elevar de forma notable las destrezas digitales de los estudiantes, su habilidad para interactuar, su valoración de la calidad de los recursos y, en última instancia, su motivación y sus resultados académicos. Estas observaciones son relevantes para la planificación del currículo y para las estrategias docentes en la educación superior, sobre todo en la formación de futuros profesores, quienes necesitaran esas competencias para orientar y conducir el aprendizaje en un entorno digital que sigue transformándose de manera rápida. Se recomienda, por tanto, que trabajos futuros midan no solo el tiempo que persisten estas ganancias, sino también los caminos precisos a través de los cuales participar en comunidades virtuales alimenta cada faceta de la alfabetización digital.

41

La desaparición total del nivel Bajo (0,0%) y el fuerte ascenso de estudiantes en la categoría Bueno (63,1%) tras el Post-Test, comparado con su casi nula presencia en el Pre-Test y la alta acumulación en Bajo y Regular, dejan en claro que las competencias digitales se comprenden y se sostienen de verdad. Este giro confirma que las estrategias docentes y tecnológicas implementadas funcionan.

Los alumnos reportaron avances marcados en su aprendizaje, mayor motivación y mejores calificaciones después de la intervención, lo que apunta a que la iniciativa benefició tanto su proceso educativo como su bienestar general. Estos datos sugieren que las comunidades de aprendizaje en línea exigen y, a la vez, cultivan habilidades digitales por encima de un mero mínimo.

Al interactuar, colaborar y construir conocimiento conjunto, los participantes hallan un marco auténtico y valioso donde aplicar herramientas digitales, conforme sostienen las teorías del aprendizaje social y situado.

Para futuros docentes, esas conclusiones afectan su formación profesional de modo inmediato. Por eso, las universidades deben integrar de forma deliberada experiencias inmersivas en comunidades en línea como parte del currículo de alfabetización digital.

Este enfoque no solo prepara a los futuros maestros para moverse con soltura en un entorno digital, sino que, además, les da las herramientas didácticas necesarias para cultivar esas mismas competencias en sus alumnos. Es por ello por lo que la investigación demuestra que destinar recursos a programas de alfabetización digital en comunidades de aprendizaje en línea empodera a los alumnos-candidatos a docentes-con competencias clave del siglo XXI. Se sugiere que estudios posteriores evalúen la durabilidad de estas ganancias y analicen los elementos que mejoran y sostienen dicha sinergia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarado, R. C. (2021). Recursos Digitales para los Aprendizajes Activos de la Asignatura de Historia, para estudiantes de Primero de Bachillerato de la Unidad Educativa Augusto Mendoza Moreira [masterThesis]. En *Repositorio de la Universidad Estatal de Milagro*. <http://repositorio.unemi.edu.ec/xmlui/handle/123456789/5818>
- Argudo, C. E. C., & Ortega, D. P. C. (2022). Las TIC en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las Ciencias Sociales. Enseñanza General Básica. *Revista Ciencia & Sociedad*, 2(2), Article 2.
- Asencio, L. Y. G., Jaramillo, L. A. R., & Macas, D. F. J. (2021). El docente y la alfabetización digital en la educación del siglo XXI. *Sociedad & Tecnología*, 4(S2), Article S2. <https://doi.org/10.51247/st.v4iS2.158>
- Erraez, L. M., Cuenca Ullaguari, J. D., Gomez Guajala, J. C., & Jara Barreto, C. V. (2025). El rol de las TIC en la enseñanza de Estudios Sociales: Un analisis de prácticas y tendencias. *Religación: Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 10(44), Article 44. <https://doi.org/10.46652/rgn.v10i44.1320>
- Filho, R. E. P. (2017). *Tendências tecnológicas na Educação*. <http://dspace.sws.net.br/handle/prefix/227>
- George, C. E. (2023). Imbricación del pensamiento computacional y la alfabetización digital en la educación. Modelación a partir de una revisión sistemática de la literatura. *Revista Española de Documentación Científica*, 46(1), Article 1. <https://doi.org/10.3989/redc.2023.1.1922>
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2010). *Metodología de la Investigación* (2da ed.). Mc Graw Hill.
- Martinez-Roig, R., Urrea-Solano, M., Álvarez-Herrero, J. F., & Merma-Molina, G. (2023). *Las infografías digitales. Un recurso para abordar la e-sostenibilidad a través de metodologías activas*. <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/160530>
- Parra, B. S., Padilla-Cáceres, J. E., & Reyes-Suarez, K. R. (2022). El Aprendizaje Basado en Problemas en las Ciencias Sociales. *Portal de la Ciencia*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.51247/pdlc.v3i2.315>

- Pereles, A., Ortega-Ruipérez, B., & Lázaro, M. (2024). *Herramientas para un mundo digital: Mejorando estrategias metacognitivas docentes para desarrollar la alfabetización digital del alumnado*. <https://doi.org/10.5944/ried.27.2.38798>
- Pérez, A., Ortega Fernández, E. A., & Pedrero Esteban, L. M. (2022). Alfabetización digital para combatir las fake news: Estrategias y carencias entre los/as universitarios/as. *Prisma Social: revista de investigación social, ISSN-e 1989-3469, N.º. 38, 2022 (Ejemplar dedicado a: Critical Thinking, Creativity and Computational Thinking in the Digital Society)*, págs. 221-243, 38, Article 38. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8532272>
- Ponce, Y. A. A. (2025). *La alfabetización digital y el uso de herramientas tecnológicas de aprendizaje en la educación superior | Revista Guatemalteca de Educación Superior*. <https://revistages.com/index.php/revista/article/view/155>
- Reyes, C. E. G., & Avello, R. (2021). Alfabetización digital en la educación. Revisión sistemática de la producción científica en Scopus. *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 21(66), Article 66. <https://doi.org/10.6018/red.444751>
- Sisalima, M. C. S., Castillo, L. L. P., Cuenca, D. L. C., & Estrada, B. M. B. (2025). El impacto de los recursos digitales interactivos en el aprendizaje de Estudios Sociales en estudiantes de Educación Básica. *Reincisol.*, 4(7), Article 7. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V4\(7\)862-891](https://doi.org/10.59282/reincisol.V4(7)862-891)
- Tello, E. A., & Paredes, P. R. (2022). Apoyos y ajustes razonables al currículo para la enseñanza de ciencias sociales en estudiantes con discapacidad intelectual. *INNOVA Research Journal, ISSN-e 2477-9024, Vol. 7, N.º. 3, 2022 (Ejemplar dedicado a: (Septiembre-Diciembre, 2022))*, 3, Article 3. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8635079>
- Villegas, D. N. (2023). Alfabetización digital y el desempeño docente de algunas instituciones educativas públicas de Trujillo – Perú. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional, ISSN-e 2550-682X, Vol. 8, N.º. 1 (ENERO 2023), 2023, págs. 365-385, 1 (ENERO 2023)*, Article 1 (ENERO 2023). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9295490>
- Viteri, M. A. R., Tixilema, D. I. T., & Torres, G. A. R. (2025). La alfabetización digital y su impacto en el desarrollo de habilidades para la investigación académica: En

contextos educativos. *Revista Social Fronteriza*, 5(1), Article 1.
[https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5\(1\)618](https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5(1)618)

ÁCIDO CAFEICO Y SUS ÉSTERES NATURALES COMO AGENTES ADYUVANTES EN ONCOLOGÍA¹⁵

CAFFEIC ACID AND ITS NATURAL ESTERS AS ADJUVANT AGENTS IN ONCOLOGY

Cristian Paz¹⁶

Cecilia Villegas¹⁷

46

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.¹⁸

¹⁵Derivado del proyecto de investigación: Ácido cafeico y sus esteres naturales como agentes adyuvantes en oncología.

¹⁶Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Medicina, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

cristian.paz@ufrontera.cl

¹⁷Departamento de Ciencias Biológicas y Químicas, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Católica de Temuco, Rudecindo Ortega, Temuco, Chile. cecilia.villegas@uct.cl

¹⁸Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

El ácido cafeico (CA) presenta tres ésteres naturales con potencial terapéutico adyuvante en oncología los cuales son el ácido clorogénico (CGA), ácido rosmarínico (RA) y éster fenético del ácido cafeico (CAPE). Estos compuestos fenólicos, están presentes de manera abundante en alimentos y plantas medicinales. El CGA es el principio activo del té verde, el RA está presente en la salvia y el romero, mientras que CAPE se encuentra en propóleos. Todos ellos poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, con capacidad dual, tanto para proteger tejidos sanos y al mismo tiempo sensibilizar células tumorales frente a quimioterapéuticos convencionales. La estructura química del CA le permite neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS) y modular vías clave asociadas con estrés oxidativo, inflamación crónica, proliferación celular, apoptosis y resistencia farmacológica, además de regular mecanismos epigenéticos claves para el desarrollo y crecimiento tumoral. Estas capacidades farmacológicas pueden variar según el tipo de compuesto, pero en general muestran gran potencial para su uso combinado en terapias dada su baja toxicidad y propiedades que favorecen la reversión de la quimio-resistencia y potencian la eficacia de fármacos antineoplásicos como cisplatino, 5-fluorouracilo, doxorubicina y paclitaxel.

El capítulo presenta detalladamente las rutas biosintéticas, fuentes naturales y mecanismos moleculares implicados en cáncer, así como reciente evidencia preclínica y clínica que respalda su uso en combinación con quimioterápicos. Finalmente, discute estrategias para mejorar su biodisponibilidad, enfatizando la necesidad de estudios clínicos rigurosos que validen su eficacia, seguridad y aplicabilidad práctica, con el fin último de integrar estos compuestos fenólicos en tratamientos oncológicos más seguros, eficaces y personalizados.

PALABRAS CLAVE: Ácido cafeico, Acido Rosmarínico, Acido Clorogénico, CAPE, Cáncer, Quimioresistencia, Quimioprotección.

ABSTRACT

Caffeic acid (CA) has three natural esters with therapeutical potential as adjuvant agents in oncology, like chlorogenic acid (CGA), rosmarinic acid (RA), and caffeic acid phenethyl ester (CAPE). These phenolic compounds, abundantly present in foods and medicinal plants. CGA is the active compound of green tea; RA is in sage and rosemary, while CAPE is found in propolis. All of them possess antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer properties determined by their dual capacity to protect healthy tissues while simultaneously sensitizing tumor cells to conventional chemotherapeutic agents. The chemical structure of CA enables it to neutralize reactive oxygen species (ROS) and modulate key pathways associated with oxidative stress, chronic inflammation, cell proliferation, apoptosis, and drug resistance, in addition to regulating epigenetic mechanisms for development and tumor growing. These pharmacological properties vary according to the specific ester derivative, but in general, they show a great potential in combinatory therapies, due to their low toxicity and properties than promote reversal of chemoresistance and enhance the efficacy of antineoplastic drugs such as cisplatin, 5-fluorouracil, doxorubicin, and paclitaxel.

The chapter provides detailed insights into the biosynthetic pathways, natural sources, and molecular mechanisms involved, as well as recent preclinical and clinical evidence supporting their use in combination with chemotherapy. Finally, strategies to improve their bioavailability are discussed, emphasizing the need for rigorous clinical studies to validate their efficacy, safety, and practical applicability, ultimately aiming to integrate these phenolic compounds into safer, more effective, and personalized cancer treatments.

Keywords: Caffeic acid, Rosmarinic acid, Chlorogenic acid, CAPE, Cancer, Chemoresistance, Chemoprotection

INTRODUCCIÓN

El tratamiento del cáncer continúa representando uno de los principales desafíos en la medicina contemporánea, especialmente por la aparición de resistencia a los fármacos quimioterapéuticos y los efectos adversos que estos generan en tejidos sanos (Lei et al., 2023). Este complejo panorama ha incentivado el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas que busquen no solo mejorar la eficacia de los tratamientos convencionales, sino también reducir su toxicidad y mejorar la calidad de vida de los pacientes. En este contexto, los compuestos fenólicos presentes en diversas plantas y alimentos han cobrado relevancia creciente, debido a su potencial como agentes adyuvantes capaces de modular múltiples rutas celulares implicadas en la progresión tumoral y en los mecanismos de resistencia farmacológica (Wu et al., 2023).

La farmacorresistencia se reconoce como la principal causa del fracaso de la quimioterapia en la mayoría de los cánceres humanos. Este fenómeno está fuertemente influenciado por factores como el tipo de tumor, el estadio clínico, la droga utilizada y la existencia de comorbilidad en el paciente (Gatti & Zunino, 2005). En este sentido, las células cancerosas pueden desarrollar resistencia a los tratamientos mediante dos mecanismos: resistencia intrínseca, presente desde el inicio del tratamiento y resistencia adquirida, que se presenta después de una respuesta inicial favorable. En oncología, el uso de terapias combinadas que integran un segundo agente antineoplásico puede generar un efecto sinérgico, incrementando la destrucción de las células tumorales y reduciendo la posibilidad de que se genere resistencia frente a un solo fármaco (Al-Lazikani et al., 2012).

Durante años, se ha propuesto la combinación de productos naturales con tratamientos oncológicos convencionales, ya que muchos de estos compuestos tienen la capacidad de interferir con múltiples blancos moleculares y rutas de señalización redundantes en las células cancerosas, dificultando su proliferación y supervivencia (Choudhari et al., 2019; Rahman et al., 2021). Por otra parte, cuando la quimioterapia resulta efectiva, aparece un nuevo desafío clínico, controlar la toxicidad en tejidos sanos, efecto que compromete seriamente la calidad de vida del paciente. Para mitigar estos efectos adversos sin reducir la eficacia terapéutica, se han desarrollado agentes conocidos como quimioprotectores. Entre ellos se encuentran moléculas sintéticas como la amifostina, aprepitant, dexrazoxano,

filgrastim, sargramostim, mesna, oprelvekin, palifermina y la eritropoyetina humana recombinante (Basu et al., 2016) y ciertos compuestos de origen vegetal, que han mostrado potencial para complementar la quimioterapia como los flavonoides y polifenoles al disminuir sus efectos secundarios y potenciar la actividad de los fármacos en el tumor. No obstante, el uso simultáneo de suplementos naturales y tratamientos convencionales continúa siendo un tema controvertido y objeto de investigación (Dobrek & Thor, 2012; Jena et al., 2010; Xiao et al., 2018).

Entre estos compuestos destaca el ácido cafeico (CA), un polifenol natural de la familia de los fenilpropanoides el cual es ampliamente distribuido en el reino vegetal **Figura 1**, particularmente en alimentos y bebidas como el café, el té de yerba mate, frutas, hortalizas y especias. Desde su identificación en 1867, el CA ha sido objeto de un creciente número de investigaciones, que han evidenciado sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas (Bovilla et al., 2021; Cortez et al., 2024b; Loboda et al., 2016). Además, destaca su rol como precursor en la biosíntesis de otros compuestos bioactivos, generando moléculas de especial interés farmacológico como el ácido clorogénico (CGA), el ácido rosmarínico (RA) y el éster fenilético del ácido cafeico (CAPE), **Figura 2**. Estos derivados comparten una base estructural común son ésteres del ácido cafeico, perteneciendo a la familia de fenilpropanos. Su biosíntesis está detallada en la **Figura 3**.

El presente capítulo tiene como objetivo central analizar el rol del ácido cafeico y de sus principales ésteres naturales CAPE, ácido clorogénico y ácido rosmarínico como agentes adyuvantes en el tratamiento del cáncer. Se abordarán sus propiedades químicas y farmacológicas, sus rutas biosintéticas, sus principales fuentes naturales, y los mecanismos moleculares mediante los cuales contribuyen a optimizar la eficacia y seguridad de las terapias antineoplásicas. Con ello, se busca ofrecer una visión integral, actualizada y accesible sobre el potencial terapéutico de estos compuestos fenólicos en oncología, orientada a estudiantes universitarios, investigadores y profesionales del ámbito biomédico.

DESARROLLO

1. Características estructurales, biosíntesis y fuentes naturales del ácido cafeico y sus derivados

1.1. Estructura química y propiedades generales

El ácido cafeico (CA) es un compuesto fenólico perteneciente a la familia de los ácidos hidroxicinámicos. Su estructura básica está formada por un anillo bencénico con dos grupos hidroxilos adyacentes (en posición orto, estructura tipo catecol), una cadena lateral insaturada (*trans*) y un grupo carboxílico terminal, tal como se observa en la **Figura 1**. Esta configuración determina en gran medida su doble función como agente antioxidante y pro-oxidante, dependiendo del entorno celular en el que actúe. La porción catecol del anillo aromático es responsable de su reconocida capacidad antioxidante, ya que puede donar electrones o átomos de hidrógeno para neutralizar radicales libres, inhibiendo así procesos de peroxidación lipídica y daño oxidativo en componentes celulares esenciales. Por otro lado, la cadena lateral conjugada con el grupo carboxilo puede participar en reacciones redox en presencia de iones metálicos como Fe^{2+} o Cu^{2+} , promoviendo la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en ambientes oxidantes. Esta dualidad estructural y funcional es particularmente relevante en el contexto del cáncer, ya que permite proteger tejidos sanos del estrés oxidativo, al tiempo que puede favorecer la inducción de muerte celular en tejidos tumorales mediante mecanismos oxidativos selectivos.

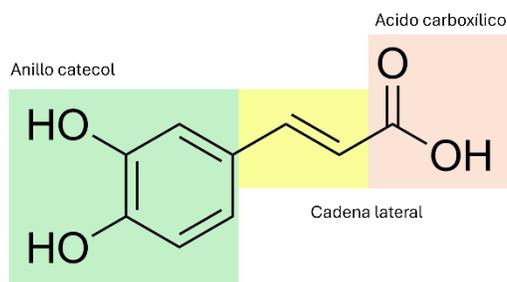


Figura 1: Estructura química del ácido cafeico

La estructura química del CA es la base para la formación de múltiples derivados bioactivos mediante enlaces éster con otros compuestos, que, en la naturaleza, ocurre gracias a la participación de enzimas específicas (Fraser & Chapple, 2011; Vogt, 2010), dando lugar a los distintos metabolitos bioactivos, ampliamente estudiados por su actividad en célula cancerígenas, tanto *in vivo* como *in vitro*. Entre estos derivados de tipo ésteres destacan: El ácido clorogénico (Cortez et al., 2024b; Lukitasari et al., 2018), el ácido rosmarínico (Al-Dhabi et al., 2014; Villegas et al., 2024) y el éster fenetílico de ácido cafeico (Akyol et al., 2012; Wu et al., 2011). Los derivados del ácido cafeico mantienen su núcleo catecol, pero la incorporación de grupos funcionales adicionales, como el ácido quínico (en el CGA), ácidos fenólicos adicionales (en el RA) o cadenas alquílicas (en el CAPE), modifican su polaridad, estabilidad y biodisponibilidad, influyendo en su comportamiento farmacológico. Las propiedades de estos tres ésteres de ácido cafeico se desarrollarán en los siguientes apartados.

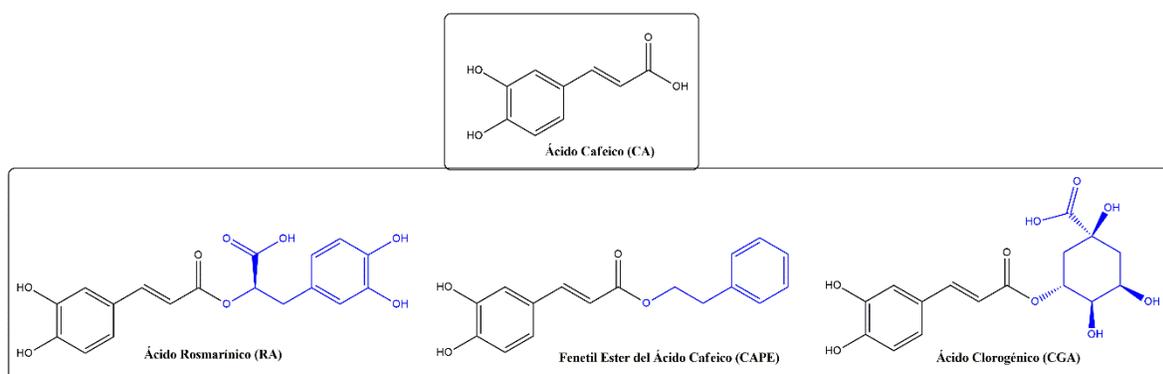


Figura 2: Estructura química del ácido cafeico y sus ésteres RA, CAPE y CGA.

1.2. Rutas biosintéticas del ácido cafeico y sus derivados

La síntesis del ácido cafeico en plantas ocurre a través de la vía del fenilpropanoide, la cual se inicia a partir de los aminoácidos fenilalanina o tirosina (Fraser & Chapple, 2011; Vogt, 2010). En una de las rutas más comunes, la fenilalanina es desaminada por la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL) para formar ácido cinámico, que posteriormente es hidroxilado en posición *para* por la enzima cinamato 4-hidroxilasa (C4H), generando ácido *p*-cumárico. Luego, este compuesto puede ser transformado en ácido cafeico mediante una hidroxilación adicional mediada por *p*-cumarato 3-hidroxilasa (C3H). Alternativamente, esta

ruta puede involucrar intermediarios activados como *p*-cumaril-CoA y cafeoil-CoA. A partir del ácido cafeico, las plantas sintetizan diversos derivados mediante reacciones de esterificación: CGA se forma por unión con ácido quínico catalizada por la enzima HQT; el RA resulta de la condensación con ácido 3,4-dihidroxifenilacético, vía rutas paralelas derivadas de tirosina y fenilalanina; y CAPE se origina por esterificación con alcohol fenético, ya sea enzimáticamente o de forma espontánea en matrices como el propóleo. Estas rutas biosintéticas han sido ampliamente estudiadas en plantas modelo como *Arabidopsis thaliana* (Fraser & Chapple, 2011), permitiendo la identificación de los genes implicados y el control regulatorio que ejercen las condiciones ambientales sobre la producción de estos compuestos (**Figura 3**).

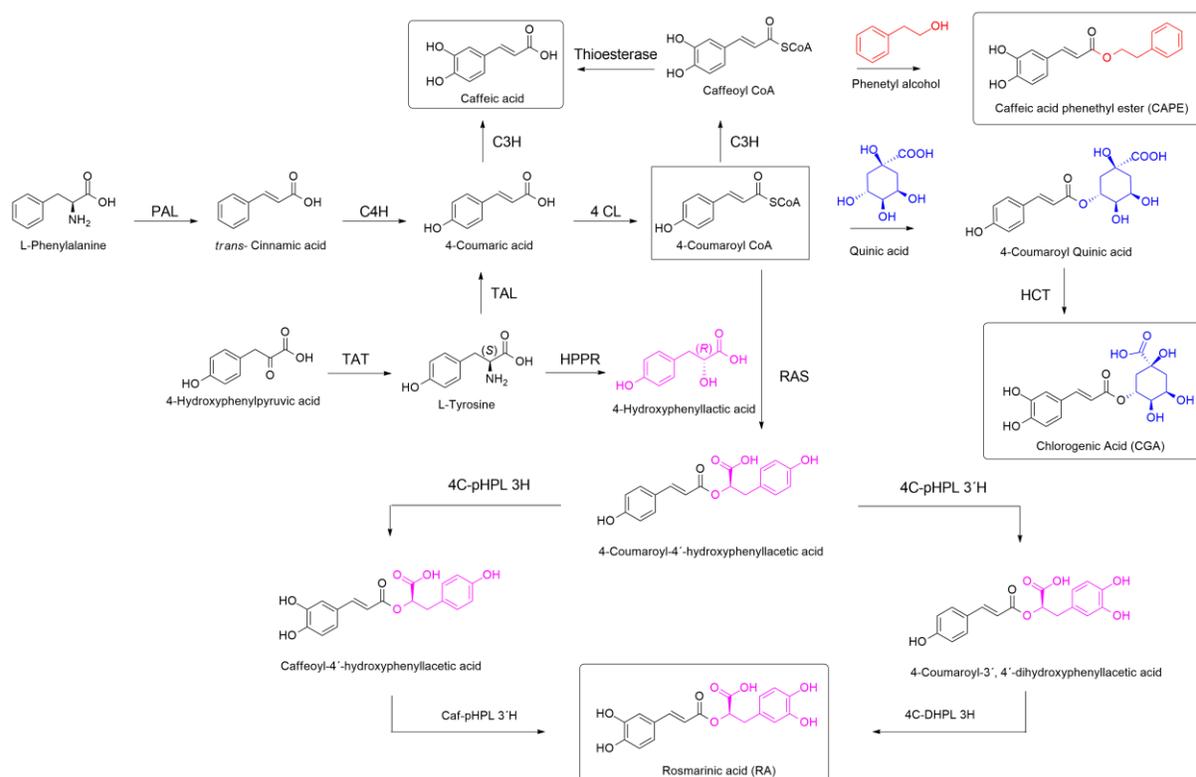


Figura 3. Vías biosintéticas para la formación del ácido cafeico (CA) y sus ésteres: ácido rosmarínico (RA, en rosado), ácido clorogénico (CGA, en azul) y éster fenético del ácido cafeico (CAPE, en rojo). El esquema muestra cómo, a partir de los aminoácidos aromáticos L-fenilalanina y L-tirosina, se generan compuestos intermedios como el ácido trans-cinámico, el ácido 4-cumárico y sus respectivas CoA, mediante la acción de enzimas como

la fenilalanina amonio liasa (PAL), el cinamato 4-hidroxilasa (C4H) y la CoA-ligasa del ácido 4-cumárico (4CL). Posteriormente, el ácido cafeico se forma por la acción de la *p*-cumarato 3-hidroxilasa (C3H) y sirve como precursor para la síntesis de ésteres bioactivos. La formación de RA involucra, además, a la tirosina aminotransferasa (TAT), la reductasa de hidroxifenilpiruvato (HPPR) y la sintetasa del ácido rosmarínico (RAS), así como a varias hidroxilasas específicas (4C-*p*HPL 3H, 4C-*p*HPL 3'H y Caf-*p*HPL 3'H). En el caso del CGA, su biosíntesis requiere de la acción de la hidroxicinamoil-CoA transferasa (HCT), mientras que la generación de CAPE implica una reacción de esterificación entre el ácido cafeico y el alcohol fenetílico. La figura también destaca la acción de una tioesterasa en la liberación final del ácido cafeico desde su forma activada (cafeoil-CoA). Este esquema integra las rutas clave de biosíntesis de compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes y quimioprotectoras ampliamente estudiadas.

1.3. Fuentes naturales y contenido en alimentos funcionales

El CA se encuentra ampliamente distribuido en el reino vegetal, presente en una gran variedad de frutas, verduras, hierbas y bebidas como el café y la yerba mate. Su contenido en los alimentos puede variar considerablemente dependiendo del tipo de planta, el grado de madurez, las condiciones de cultivo, procesamiento y almacenamiento (Manach et al., 2004).

Entre sus fuentes más destacadas se encuentran el café recién tostado, diversas frutas como las manzanas, peras y cerezas, y vegetales como el brócoli, zanahoria y espinaca. Además, también está presente en hongos comestibles y hierbas aromáticas (Çayan et al., 2020; Meinhart et al., 2019). Esta amplia distribución hace del ácido cafeico un compuesto de interés nutricional y farmacológico. La **tabla 1** resume las principales fuentes naturales.

El CGA es particularmente abundante en el café verde, donde constituye del 5 - 14 % del peso seco de los granos y es tradicionalmente consumido en bebidas como la yerba mate, aunque también está presente en semillas, sin embargo, su estabilidad térmica es limitada, lo que provoca degradación o transformación en derivados durante procesos como el tostado, la cocción o el secado (Clifford, 1999; Clifford et al., 2017). Por otro lado, el RA se concentra principalmente en plantas de la familia *Lamiaceae*, donde actúa como un marcador de quimiotaxonomía (Trócsányi et al., 2020), está presente en hierbas como romero

(*Rosmarinus officinalis*), albahaca (*Ocimum basilicum*), melisa (*Melissa officinalis*) y orégano (*Origanum vulgare*), especies comúnmente utilizadas en la cocina y la medicina tradicional. El RA también ha sido identificado en especies de la familia *Labiatae*, tales como menta (*Mentha spicata*) y poleo (*Mentha pulegium*) (Shekarchi et al., 2012). Finalmente, el CAPE se encuentra principalmente en el propóleo, una mezcla de resinas vegetales, cera y secreciones de abejas, cuyo contenido varía según la flora local, pudiendo alcanzar niveles farmacológicamente activos (Bankova et al., 2018).

Tabla 1. Principales fuentes naturales de ácido cafeico y sus derivados fenólicos.

Compuesto	Fuentes naturales (nombre común)
Ácido cafeico	Café, yerba mate, manzanas, peras, cerezas, uvas, brócoli, espinaca, zanahoria, hongos
CAPE	Propóleos (producto de resinas vegetales transformadas por abejas)
Ácido rosmarínico	Romero, salvia, albahaca, orégano, menta, bálsamo de limón
Ácido clorogénico	Café verde, yerba mate, alcachofa, girasol, batata, berenjena, zanahoria

2. Mecanismos de acción de los derivados del ácido cafeico como quimioprotectores

2.1. Regulación del estrés oxidativo.

El estrés oxidativo es un estado celular caracterizado por un desequilibrio entre la generación de ROS y la capacidad del sistema antioxidante para neutralizarlas eficazmente. Este desbalance puede inducir daño a componentes celulares esenciales como lípidos, proteínas y ADN alterando la homeostasis (Janssen-Heininger et al., 2008; Sies, 2015). En el contexto del cáncer, las ROS desempeñan un papel dual. A niveles moderados, favorecen la proliferación celular, la angiogénesis y la resistencia a fármacos, actuando como segundos mensajeros en diversas rutas de señalización implicadas en la progresión tumoral. Sin embargo, una acumulación excesiva de ROS puede sobrepasar la capacidad antioxidante de las células y desencadenar mecanismos de muerte celular como apoptosis o necrosis, lo que ha sido aprovechado terapéuticamente para inducir citotoxicidad selectiva en células tumorales (Gorrini et al., 2013; Schumacker, 2006).

El CA y sus derivados presentan efectos antioxidantes significativos, los cuales pueden ser utilizados para proteger tejidos sanos frente al daño ocasionado por la quimioterapia. Esta capacidad se ejerce a través de mecanismos directos, como la neutralización ROS, dado por su estructura química de tipo catecol, que dona electrones para estabilizar radicales libres (Kurek-Górecka et al., 2013), así como por mecanismos indirectos mediante la modulación positiva de vías de señalización asociadas al estrés oxidativo. Una de estas vías es el factor de respuesta antioxidante Nrf2/ARE, un eje regulador clave que conduce al aumento en la expresión de las enzimas antioxidantes hemo oxigenasa-1 (HO-1), superóxido dismutasa (SOD), catalasa y NAD(P)H:quinona oxidoreductasa 1 (NQO1) (Cortez et al., 2024a; Sirota et al., 2015; Xiang et al., 2022; Yin et al., 2022). Además, se ha demostrado que el CAPE posee una notable capacidad antioxidante, evidenciada por su eficacia en la reducción de radicales DMPD^+ , DPPH y $\text{O}_2^{\cdot-}$, en comparación con compuestos antioxidantes estándar. Asimismo, presenta una capacidad reductora significativa, manifestada en la conversión de Fe^{3+} a Fe^{2+} en ensayos químicos *in vitro* (Göçer & Gülçin, 2011). En estudios celulares, también se observó que reduce los niveles de malondialdehído (MDA), un marcador de daño oxidativo, en fibroblastos de ratón (Bai et al., 2014). Además, mejora la viabilidad de células sanas sin afectar la citotoxicidad sobre células tumorales, tanto en modelos celulares como en animales tratados con doxorrubicina, cisplatino y otros agentes citotóxicos (Yagmurca et al., 2004).

2.2. protección frente a la inflamación crónica

A diferencia de muchos agentes quimioterapéuticos, los derivados del ácido cafeico también exhiben propiedades citoprotectoras las cuales derivan principalmente de su capacidad moduladora sobre NF- κ B (*nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells*), que es un regulador crucial de la respuesta inflamatoria. Esta capacidad resulta especialmente relevante para la protección de tejidos sanos circundantes al tumor, atenuando los efectos tóxicos colaterales de la quimioterapia sin interferir necesariamente en su eficacia antineoplásica.

Tanto RA como el CGA han demostrado propiedades antiinflamatorias y citoprotectoras mediante mecanismos convergentes que implican la inhibición de la vía de

señalización NF- κ B. Ambos compuestos previenen la translocación nuclear de este factor y reducen la expresión de citoquinas proinflamatorias como TNF- α , IL-1 β e IL-6, así como mediadores del estrés oxidativo y de la apoptosis. Estas acciones se han asociado con efectos protectores sobre diversos órganos afectados por toxicidades inducidas por quimioterapia. El CGA ha mostrado eficacia en modelos de nefrotoxicidad, hepatotoxicidad y disfunción testicular (E Owumi et al., 2021; Komeili-Movahhed et al., 2023; Qu et al., 2020), mientras que el RA ha evidenciado beneficios en la protección renal, ovárica, auditiva y neurológica (Areti et al., 2018; Domitrović et al., 2014; Gui et al., 2021; Jeong et al., 2011). Por otro lado, el CAPE también exhibe propiedades citoprotectoras, especialmente en tejidos cardiacos expuestos a quimioterapia con antraciclinas. En modelos murinos, CAPE redujo la cardiotoxicidad inducida por doxorubicina, disminuyendo la apoptosis de cardiomiocitos, reduciendo la peroxidación lipídica y mejorando la función ventricular izquierda (Jiang et al., 2025). Mecánicamente, CAPE ejerció este efecto protector al inhibir la activación de la vía NF- κ B y promover la inducción de las enzimas antioxidantes glutatión peroxidasa (GPx) y HO-1. En modelos in vitro de células cardiacas H9c2 (células de mioblasto cardíaco de rata) y AC16 (células de miocito ventricular humano) expuestas a doxorubicina, se observó que CAPE redujo notablemente la generación de ROS, preservando la integridad mitocondrial y limitando la necroptosis mediada por la vía ROS-MLKL (*Mixed Lineage Kinase Domain-Like protein*) (Jiang et al., 2025). Esta evidencia preclínica respalda el potencial de estos derivados como agentes quimioprotectores debido mayoritariamente a la capacidad compartida para inhibir la activación de NF- κ B, reducir el estrés oxidativo.

57

3. Mecanismos de acción de los derivados del ácido cafeico como quimiosensibilizadores en el tumor.

3.1. Modulación de vías de señalización implicadas en cáncer.

CA, CAPE, RA y CGA han demostrado una notable capacidad para modular rutas de señalización celular asociadas con la transformación maligna, progresión tumoral y evasión inmunitaria (Kabała-Dzik et al., 2017). En relación a esto, estudios recientes en células cancerígenas muestran que estos compuestos pueden inducir apoptosis al afectar la función mitocondrial y aumentar los niveles de ROS específicamente en células tumorales, mientras

inhiben rutas clave como PI3K/Akt, AMPK, mTOR y ERK/MAPK, que suelen estar desreguladas en tumores resistentes (Mirzaei et al., 2021), esta versatilidad mecanicista ofrece una base racional para su uso alternativo como agentes adyuvantes en terapias antineoplásicas combinadas (**Figura 4**). Una de las vías más relevantes modulada por estos compuestos en estas células es NF- κ B que además de ejercer una función inflamatoria, como se describe en el apartado anterior, es un regulador de proliferación y resistencia a la apoptosis en el cáncer (Taniguchi & Karin, 2018). CAPE es particularmente potente en este contexto: impide la fosforilación y degradación de I κ B α , bloqueando así la translocación del dímero p65/p50 al núcleo, los principales efectores en la vía canónica. Esta inhibición reduce la transcripción de genes relacionados con la supervivencia celular como *BCL-2*, *XIAP* ("*X-linked inhibitor of apoptosis protein*") y citoquinas proinflamatorias (McEleny et al., 2004). Esta interferencia ha sido asociada a una reversión parcial de la resistencia a fármacos como el paclitaxel o la doxorubicina (Kleczyka et al., 2023; Liang et al., 2023).

En cánceres como el de próstata, donde la vía PI3K/Akt está sobreexpresada, la intervención con CAPE (20–80 μ M) en líneas PC-3 y DU-145 desencadena apoptosis y provoca la disminución de marcadores de transición epitelio-mesénquima, mediante la inhibición de PI3K/Akt, NF- κ B y Wnt/EMT, lo que se evidencia a nivel proteico, por la reducción significativa de los niveles de fosfo-Akt, Thr308, NF- κ B p65 y Myc, junto con la elevación simultánea de pro-caspasa-3 y GSK-3 β , reguladores de apoptosis (Tseng et al., 2016). Además, se ha reportado que CAPE puede ampliar la ventana terapéutica en adenocarcinomas pulmonares al modificar la distribución del ciclo celular y resensibilizar específicamente las líneas celulares de adenocarcinoma a la radiación, sin afectar a aquellas de origen no adenocarcinómico (Prades-Sagarra et al., 2024).

En el contexto del cáncer, el RA modula diversas vías como NF- κ B, MAPK, PI3K/Akt y Fas/FasL las cuales regulan la inflamación crónica, proliferación celular sin control, evasión de la apoptosis y progresión tumoral y favorecen la resistencia del tumor (Ma et al., 2020). Aunque el efecto del RA sobre la vía NF- κ B es más indirecto que el del CAPE, ejerce una acción antiinflamatoria sistémica al inhibir activadores upstream como TLR4, así como las cinasas ERK1/2 y JNK. En estudios in vitro, se ha observado que RA reduce la expresión de mediadores inflamatorios y regula negativamente el eje Fas/FasL, lo

que conlleva una menor activación de caspasas y una mayor inducción de apoptosis en células tumorales (Mahmoud et al., 2021). En cultivos de células hepáticas HepG2, RA actúa como inhibidor de la quinasa Fyn, lo que regula la vía PI3K/Akt/NF- κ B, resultando en menor proliferación, reducción de metaloproteinasas MMP-2 y MMP-9 y mayor apoptosis (An et al., 2021). Las metaloproteinasas son proteínas de matriz extracelular que facilitan la invasión y metástasis tumoral, por lo que su supresión contribuye a limitar la diseminación del cáncer. Asimismo, en líneas de glioblastoma resistentes, RA suprime el eje SIRT1/FOXO1/NF- κ B y bloquea la vía PTEN/PI3K/Akt, induciendo apoptosis y autofagia mediante activación de ERK1/2 (Şengelen & Önay-Uçar, 2024). El eje SIRT1/FOXO1, frecuentemente sobreexpresado en tumores agresivos, por tanto, su modulación por RA en modelos de glioblastoma resistente contribuye a revertir mecanismos de escape apoptótico al limitar la función citoprotectora de FOXO1 y restablecer rutas de muerte celular. Por otra parte, la regulación de PTEN/PI3K/Akt es crítica, ya que esta ruta suele estar sobreactivada en tumores, promoviendo la supervivencia celular, resistencia a fármacos y progresión maligna.

La vía de señalización MAPK/ERK es fundamental para regular la proliferación, diferenciación y migración celular, y su activación sostenida en tumores se asocia a agresividad, invasión metastásica y resistencia al tratamiento. El CGA puede actuar sobre esta ruta al inhibir la fosforilación de ERK1/2 y, simultáneamente, modular la vía PI3K/Akt/mTOR, lo que conduce a una detención del ciclo celular en fases G0/G1 o G2/M, dependiendo del tipo celular (Alzahrani et al., 2023). Esta detención se acompaña de un aumento en el cociente BAX/BCL-2 y de la activación de caspasa-3, promoviendo la apoptosis. En líneas como HT-29, CGA también induce la expresión de p53 junto con p21, reforzando la pausa del ciclo celular para permitir la reparación del ADN o, en caso contrario, facilitar la apoptosis (Ranjbary et al., 2023). La función de p53, como centinela genómico, es crucial para evitar la propagación de mutaciones en células tumorales (Zilfou & Lowe, 2009), esta modulación mejora la efectividad de la quimioterapia, al aumentar la sensibilidad de las células malignas a los daños inducidos por los agentes citotóxicos.

Para comprender con mayor claridad los mecanismos moleculares mediante los cuales estos compuestos fenólicos potencian los efectos de la quimioterapia, se resume en la **figura 4**, donde se muestra su acción sobre las principales rutas de señalización involucradas

en proliferación celular, inflamación, supervivencia y resistencia tumoral (EGFR/Ras/ERK, PI3K/AKT/mTOR y TLR/NF- κ B). La inhibición selectiva de estos ejes activados de forma aberrantes en las células cancerígenas apunta no solo potenciar la eficacia antitumoral de agentes quimioterapéuticos, sino también preservar tejidos sanos de los efectos adversos inducidos por estos tratamientos.

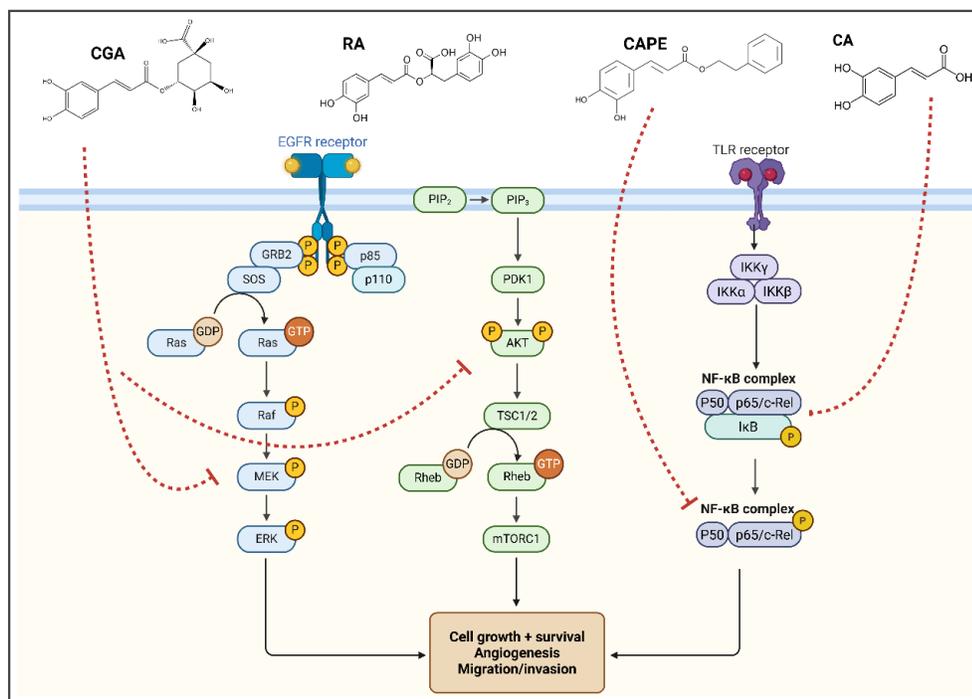


Figura 3. Mecanismos de inhibición de vías de señalización oncogénicas por compuestos derivados del ácido cafeico.

3.2. Sensibilización a agentes quimioterapéuticos y reversión de la quimiorresistencia.

Uno de los aportes más destacados de los derivados del ácido cafeico en oncología experimental es su capacidad para actuar como sensibilizadores tumorales, revirtiendo mecanismos de quimiorresistencia intrínseca y adquirida. Los esteres de ácido cafeico han demostrado potencial *in vitro* e *in vivo* para revertir la resistencia a doxorubicina, cisplatino,

paclitaxel y oxaliplatino (Cortez et al., 2024b; Teng et al., 2020; Villegas et al., 2024). Al restaurar la acumulación intracelular de estos agentes, se favorece un entorno más eficaz para la acción de los tratamientos (Tinoush et al., 2020). Actualmente existen múltiples estudios tanto *in vivo* como *in vitro* que han puesto en evidencia este rol. En las **tablas 2 y 3** se presenta un resumen del efecto de los diferentes ésteres de ácido cafeico, así como de las drogas potenciadas, según la evidencia experimental *in vitro* y los estudios preclínicos.

Tabla 2. Evidencia preclínica del ácido clorogénico (CGA) como potenciador de la eficacia de quimioterapéuticos convencionales, según datos revisados por (Cortez et al., 2024b)

Tipo de cáncer (referencia)	Condiciones del tratamiento	Hallazgos y mecanismos de acción	Efectos clínicos potenciales
Carcinoma hepatocelular (Yan et al., 2015)	In vitro (HepG2 y Hep3B): 250 μ M de CGA y 20 μ M de 5-FU durante 4 h	Supresión de la activación de ERK a través de la sobreproducción de ROS.	Sensibiliza las células frente al 5-FU
carcinoma cervical humano (Catanzaro et al., 2016)	In vitro (A431): 10^{-6} – 10^{-4} M de CGA y 1 μ M de cisplatino o 2 μ M de oxaliplatino durante 24 h	No determinado	Incrementa la actividad de cisplatino y oxaliplatino
Osteosarcoma (Salzillo et al., 2021)	In vitro (U2OS y MG-63): 200 μ M de CGA y 0.1 μ M de DOX durante 48 h	Disminución de la viabilidad celular y el crecimiento, inducción de apoptosis, inhibición de la quinasa activada por mitógenos ERK1/2.	Sinergia entre CGA y DOX
Carcinoma hepatocelular (Refolo et al., 2018)	In vitro (PLC/PRF/5 y HepG2): 0.1 μ M (PLC/PRF/5) o 1 μ M (HepG2) y 100 μ M de CGA + regorafenib	Activación Bax y caspasas 3/7, inhibición de Bcl-2 y Bcl-xL, Inhibición de las vías MAPK y PI3K/Akt/mTOR.	Potenciación del efecto de regorafenib
Carcinoma sólido de Ehrlich (Abd Elrazik et al., 2019)	In vivo: CGA (60 mg/kg vía oral) y DOX (2 mg/kg/día, intraperitoneal) diariamente durante 21 días.	Regulación positiva de la expresión génica de TRAIL/TRAILR2, FasL/Fas y caspasas-3, Regulación negativa de la expresión de Bcl-2.	Disminución en el volumen y peso tumoral.

Tabla 3. Dosis de ácido rosmarínico aplicada en estudios preclínicos asociada con la reversión de la quimiorresistencia a fármacos convencionales en modelos de cáncer, según datos revisados por (Villegas et al., 2024)

Tipo de cáncer (referencia)	Condiciones del tratamiento	Efecto en vías moleculares	Efectos clínicos potenciales
Cáncer de pulmón no microcítico (Liao et al., 2020)	In vitro (A549 resistentes a cisplatino): RA (5–10 µg/mL) + cisplatino (IC50) por 48 h. In vivo (BALB/c-nu/nu): RA (10 mg/kg/día, IP) y cisplatino una vez cada 5 días	Regulación negativa de P-gp, activación de JNK/c-Jun (vía MAPK)	Reversión del efecto clínico de la multirresistencia a fármacos
Cáncer gástrico (Li et al., 2013)	In vitro (SGC7901 resistentes a Adriamicina): RA (2.4 y 12 µM) + adriamicina (IC50) por 48 h	Disminución de la transcripción génica de MUK1	Reversión de la multirresistencia a fármacos
Cáncer renal (Chou et al., 2020)	In vitro: (RCC 786-O): RA (25–200 µg/mL) + cisplatino (5 µM) por 48 h	Inhibición de la fosforilación de FAK	Potenciación de la eficacia del cisplatino
Melanoma maligno (Huang et al., 2021)	In vitro (A375): RA (50–200 µg/mL) pretratamiento por 24 h, seguido de cisplatino (8 µM) y cotratamiento por 24 h más	Regulación negativa del eje ADAM17/EGFR/AKT/GSK3β	Potenciación de la eficacia del cisplatino
Carcinoma sólido de Ehrlich (Mahmoud et al., 2021)	In vivo (female Swiss albino mice) RA (100 mg/kg/día, oral) + paclitaxel (10 mg/kg, IP), tres veces por semana	Modulación de las vías NF-κB, p53 y caspasa-3	Potenciación del efecto terapéutico del paclitaxel
Cáncer gástrico (Yu et al., 2019)	In vitro (SGC7901 resistentes a 5-Fu): RA (15 µg/mL) + 5-Fu (50 µg/mL)	Regulación positiva de la expresión de FOXO4	Reversión de la quimiorresistencia a 5-Fu
Cáncer gástrico (Radziejewska et al., 2021)	In vitro (AGS): RA (100–200 µg/mL) + anti-MUC1 (5 µg/mL) por 24 h	Regulación negativa de MUC1 y de genes BAX, Bad, y caspasa 9	Potenciación de la eficacia anti-MUC1
Cáncer de mama (Saray et al., 2022)	In vitro (MDA-MB231): RA (10 µM) + docetaxel (2 nM) por 24 h	No determinado	Potenciación del efecto del docetaxel
Cáncer de ovario (Lim et al., 2020)	In vitro (SKOV-3 (resistente a cisplatino): RAME* (40 µM) + cisplatino (10 µM) por 24 h	Regulación negativa de genes regulados por FOXM1	Potenciación de la eficacia del cisplatino
Cáncer cervical (Nam et al., 2019)	In vitro (HeLa y SiHa): RAME* (80 µM) por 24 h	Inhibición de la vía mTOR/S6K1	Reversión de la quimiorresistencia al cisplatino

*RAME: Metil éster de ácido rosmarínico

El CAPE también ha demostrado efecto quimiosensibilizador al potenciar la acción de docetaxel, paclitaxel, y doxorubicina en múltiples líneas celulares tumorales. En células de cáncer de próstata (líneas PC-3, DU-145 y LNCaP), la combinación de CAPE con docetaxel o paclitaxel mostró una sinergia clara, evidenciada por la disminución de cyclin

D1 y c-myc, así como por una mayor actividad de caspasa-3 y una reducción de la ratio Bcl-2/Bax; estos efectos se acompañaron de la inhibición de la fosforilación de AKT, ERK y ER- α (Tolba et al., 2013). En células de cáncer de mama (MCF-7 y MDA-MB-231), CAPE no solo bloqueó NF- κ B y redujo la expresión de mdr-1, asociado a la resistencia química, sino que también incrementó la apoptosis y la detención del ciclo celular, sin dañar significativamente las células normales (Wu et al., 2011). Además, CAPE ha mostrado efectos radiosensibilizadores, especialmente en células de carcinoma pulmonar de células no pequeñas (NSCLC). En estos modelos, el pretratamiento con CAPE potenció significativamente la citotoxicidad inducida por radiación ionizante, promoviendo la fragmentación del ADN, la pérdida del potencial de membrana mitocondrial y la activación de caspasas proapoptóticas (Chen et al., 2004).

3.3. Regulación epigenética y expresión génica

Además, de la modulación de vías de señalización críticas, estudios recientes han evidenciado que esteres de ácido cafeico pueden modular la expresión de microARNs asociados con resistencia, como miR-21, miR-155 y miR-27a, regulando genes relacionados con apoptosis, ciclo celular y respuesta al estrés. Esta regulación epigenética contribuye a la reprogramación de células tumorales resistentes y a la restauración de su sensibilidad a fármacos. Por ejemplo, CAPE modula enzimas como histona deacetilasas (HDACs) y DNA metiltransferasas (DNMTs) (Alzahani & El-Magd, 2024; Omene et al., 2013), dichos mecanismos pueden interferir con la resistencia adquirida y contribuir a la reprogramación del fenotipo tumoral, abriendo nuevas posibilidades terapéuticas en oncología personalizada.

4. Aplicación Clínica.

4.2. Evidencia clínica actual

Actualmente, si bien la mayoría de los estudios con derivados del ácido cafeico se encuentran en fases preclínicas, ya existen algunos ensayos clínicos en curso que evalúan su efecto como coadyuvantes, especialmente en formulaciones combinadas con quimioterápicos convencionales. Por ejemplo, el CGA ha ingresado recientemente a fase I/II en China como tratamiento inmunoterapéutico contra gliomas de alto grado mediante

inyecciones intramusculares, demostrando buena tolerabilidad y beneficios preliminares, incluyendo control de enfermedad estable en ≥ 50 % de los pacientes (Kang et al., 2023).

Por otra parte, se han investigado suplementos de propóleos ricos en CAPE en pacientes con cáncer de mama y colorrectal. En un ensayo clínico en cáncer de mama, su adición coadyuvante mostró reducción de ciertos efectos adversos y mejora en marcadores antioxidantes y calidad de vida (Hermansyah et al., 2022). La **Tabla 4** resume los principales ensayos clínicos identificados en plataformas como ClinicalTrials.gov y PubMed, enfocados específicamente en evaluar la eficacia y seguridad del ácido cafeico, el ácido clorogénico, el ácido rosmarínico y el CAPE en distintos tipos de cáncer.

Tabla 4. Ensayos clínicos y estado de evaluación de ácido cafeico y sus derivados en oncología.

Molécula	Fase	Cáncer objetivo	Resultado / Estado	Fuente
Ácido cafeico	I	Carcinoma escamoso esofágico avanzado (ESCC)	En curso: evaluación de eficacia y seguridad; inhibición GASC1 (“inhibitor Caffeic Acid”)	NCT04648917
Ácido clorogénico	I	Cáncer avanzado (diversos tipos)	Terminó: inyección IV tolerada; dosis máxima tolerada establecida	NCT02136342
Rosmarínico	II	Fatiga relacionada con tumores sólidos	Ensayo con extracto rico en Ácido rosmarínico redujo fatiga; aún sin datos tumorales	NCT04546607
CAPE	0/I	Diversos tumores (ninguno listado explícitamente)	Solo preclínico; se recomienda evaluación clínica futura	

El ácido clorogénico y el ácido cafeico han sido los más estudiados en contextos oncológicos específicos, mostrando buena tolerabilidad y potencial terapéutico, particularmente en combinación con tratamientos estándar. Sin embargo, la evidencia clínica aún es limitada, tanto en número de estudios como en el tamaño de las muestras y duración del seguimiento. Por otro lado, el ácido rosmarínico ha sido evaluado en relación con síntomas asociados al cáncer, como la fatiga, más que como agente antitumoral directo,

mientras que CAPE, a pesar de sus robustos efectos preclínicos, aún no ha sido objeto de ensayos clínicos registrados en humanos.

5. Biodisponibilidad.

La biodisponibilidad de estos compuestos depende de varios factores, entre ellos su forma química (libre o conjugada), la matriz alimentaria en la que se encuentra, las condiciones de procesamiento de los alimentos (Stanciauskaite et al., 2023), y las características fisiológicas del consumidor (como el microbiota intestinal y el estado metabólico). El ácido cafeico libre se absorbe en el intestino delgado por difusión pasiva, aunque puede sufrir procesos de glucuronidación y sulfatación en el hígado, lo que reduce su forma activa en circulación (Cortez et al., 2024a). Sus derivados, como el ácido clorogénico, se absorben más lentamente, siendo metabolizados en el colon por el microbiota, lo que modula su eficacia (Lafay et al., 2006; Sova & Saso, 2020). A pesar de una biodisponibilidad moderada, existen estrategias para mejorarla con vistas a una aplicación clínica efectiva. Entre estas, se destacan la formulación de sistemas de liberación controlada como nanopartículas, liposomas o conjugados con polímeros que protejan al compuesto durante su paso por el tracto gastrointestinal y faciliten su absorción. Además, el uso de pro-fármacos o la síntesis de derivados más estables ha demostrado mejorar la estabilidad metabólica y la absorción sistémica de estos compuestos (**Tabla 5**). El CAPE, ha sido estudiado por su mejor perfil de estabilidad y permeabilidad, y se encuentra en suplementos de propóleo comercializados en diversas formulaciones orales (Pérez et al., 2023). Otra estrategia es la coadministración con inhibidores de enzimas metabolizadoras o moduladores de transportadores intestinales, así como formulaciones orales mejoradas con excipientes que aumenten la solubilidad. Estas aproximaciones han mostrado resultados prometedores en estudios preclínicos, abriendo la posibilidad de optimizar la biodisponibilidad en un contexto terapéutico.

Tabla 5: Estrategias para mejorar la biodisponibilidad de derivados del ácido cafeico.

Estrategia	Efecto principal observado	Referencia
Liposomas y nanopartículas lipídicas	Mayor estabilidad, liberación controlada y eficiencia de encapsulación de hasta 76 %	(Dejeu et al., 2021)
Nanopartículas poliméricas (ej. PLGA)	Mejora en la encapsulación (~95 %), protección gastrointestinal, liberación sostenida	(Selmin et al., 2015)
Uso de excipientes (ej. poloxámero, ciclodextrinas)	Incremento en solubilidad y velocidad de disolución (>85 % en 30 min)	(Stanciauskaite et al., 2023)
Conjugados con dendrímeros PAMAM	Mejora en absorción, estabilidad metabólica y autoensamblaje en micelas	(Ren et al., 2023)
Pro-fármacos y conjugados poliméricos	Potencial para preservar la forma activa durante tránsito intestinal; prometedor para administración oral	(Andrade et al., 2023)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El ácido cafeico y sus derivados CGA, RA y CAPE representan una prometedora alternativa terapéutica complementaria en el campo de la oncología, debido a su capacidad dual para proteger los tejidos sanos y sensibilizar células tumorales frente a tratamientos convencionales. La evidencia presentada sugiere que estos compuestos podrían superar algunas limitaciones críticas en el tratamiento actual del cáncer, como la farmacoresistencia y la toxicidad sistémica, mediante la regulación de múltiples vías celulares y mecanismos epigenéticos implicados en la progresión tumoral y en la respuesta a la terapia. Si bien los resultados preclínicos son alentadores, la aplicación clínica de estos compuestos requiere más estudios, especialmente ensayos clínicos que confirmen su eficacia, seguridad y perfiles farmacocinéticos en humanos. Además, optimizar la biodisponibilidad y diseñar formulaciones específicas serán claves para que estos compuestos fenólicos logren integrarse de manera efectiva en la práctica oncológica, beneficiando así a los pacientes mediante terapias más seguras y eficaces.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abd Elrazik, N. A., El-Mesery, M., El-Karef, A., Eissa, L. A., & El Gayar, A. M. (2019). Chlorogenic acid potentiates antitumor effect of doxorubicin through upregulation of death receptors in solid Ehrlich carcinoma model in mice. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(1), 158-172.
- Akyol, S., Ginis, Z., Armutcu, F., Ozturk, G., Yigitoglu, M. R., & Akyol, O. (2012). The potential usage of caffeic acid phenethyl ester (CAPE) against chemotherapy-induced and radiotherapy-induced toxicity. *Cell Biochem Funct*, 30(5), 438-443. doi:10.1002/cbf.2817
- Al-Dhabi, N. A., Arasu, M. V., Park, C. H., & Park, S. U. (2014). Recent studies on rosmarinic acid and its biological and pharmacological activities. *Excli j*, 13, 1192-1195.
- Al-Lazikani, B., Banerji, U., & Workman, P. (2012). Combinatorial drug therapy for cancer in the post-genomic era. *Nature Biotechnology*, 30(7), 679-692. doi:10.1038/nbt.2284
- Alzahani, F., & El-Magd, M. A. (2024). Co-Treatment of Caffeic Acid Phenethyl Ester with Chitosan Nanoparticles Inhibits DNA Methylation in HepG2 Cells. *Pakistan Journal of Zoology*, 56(2), 523.
- Alzahrani, B., Elderderly, A. Y., Alsrhani, A., Alzerwi, N. A. N., Althobiti, M. M., Rayzah, M., et al. (2023). Effects of Albumin-Chlorogenic Acid Nanoparticles on Apoptosis and PI3K/Akt/mTOR Pathway Inhibitory Activity in MDA-MB-435s Cells. *Nanomaterials (Basel)*, 13(9). doi:10.3390/nano13091438
- An, Y., Zhao, J., Zhang, Y., Wu, W., Hu, J., Hao, H., et al. (2021). Rosmarinic Acid Induces Proliferation Suppression of Hepatoma Cells Associated with NF- κ B Signaling Pathway. *Asian Pac J Cancer Prev*, 22(5), 1623-1632. doi:10.31557/apjcp.2021.22.5.1623
- Andrade, S., Pereira, M. C., & Loureiro, J. A. (2023). Caffeic acid loaded into engineered lipid nanoparticles for Alzheimer's disease therapy. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 225, 113270. doi:10.1016/j.colsurfb.2023.113270
- Areti, A., Komirishetty, P., Kalvala, A. K., Nellaiappan, K., & Kumar, A. (2018). Rosmarinic Acid Mitigates Mitochondrial Dysfunction and Spinal Glial Activation in Oxaliplatin-induced Peripheral Neuropathy. *Mol Neurobiol*, 55(9), 7463-7475. doi:10.1007/s12035-018-0920-4

- Bai, H., Liu, R., Chen, H. L., Zhang, W., Wang, X., Zhang, X. D., et al. (2014). Enhanced antioxidant effect of caffeic acid phenethyl ester and Trolox in combination against radiation induced-oxidative stress. *Chem Biol Interact*, 207, 7-15. doi:10.1016/j.cbi.2013.10.022
- Bankova, V., Trusheva, B., & Popova, M. (2018). Caffeic acid phenethyl ester (CAPE) - natural sources, analytical procedures and synthetic approaches. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 71(9), 1157–1169.
- Basu, A., Bhattacharjee, A., & Bhattacharya, S. (2016). Chemoprotectants in Cancer Chemotherapy: An Update. *Biomedical Research Journal*, 3(2).
- Bovilla, V. R., Anantharaju, P. G., Dornadula, S., Veeresh, P. M., Kuruburu, M. G., Bettada, V. G., et al. (2021). Caffeic acid and protocatechuic acid modulate Nrf2 and inhibit Ehrlich ascites carcinomas in mice. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 11(6).
- Catanzaro, D., Filippini, R., Vianello, C., Carrara, M., Ragazzi, E., & Montopoli, M. (2016). Chlorogenic acid interaction with cisplatin and oxaliplatin: studies in cervical carcinoma cells. *Natural Product Communications*, 11(4), 1934578X1601100421.
- Çayan, F., Deveci, E., Tel-Çayan, G., & Duru, M. E. (2020). Identification and quantification of phenolic acid compounds of twenty-six mushrooms by HPLC–DAD. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1690-1698. doi:10.1007/s11694-020-00417-0
- Chen, M.-F., Wu, C.-T., Chen, Y.-J., Keng, P. C., & Chen, W.-C. (2004). Cell killing and radiosensitization by caffeic acid phenethyl ester (CAPE) in lung cancer cells. *Journal of radiation research*, 45(2), 253-260.
- Chou, S. T., Ho, B. Y., Tai, Y. T., Huang, C. J., & Chao, W. W. (2020). Bidirect effects from cisplatin combine with rosmarinic acid (RA) or hot water extracts of *Glechoma hederacea* (HWG) on renal cancer cells. *Chin Med*, 15, 77. doi:10.1186/s13020-020-00358-2
- Choudhari, A. S., Mandave, P. C., Deshpande, M., Ranjekar, P., & Prakash, O. (2019). Phytochemicals in Cancer Treatment: From Preclinical Studies to Clinical Practice. *Front Pharmacol*, 10, 1614. doi:10.3389/fphar.2019.01614
- Clifford, M. N. (1999). Chlorogenic acids and other cinnamates—nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(3), 362-372.

- Clifford, M. N., Jaganath, I. B., Ludwig, I. A., & Crozier, A. (2017). Chlorogenic acids and the acyl-quinic acids: discovery, biosynthesis, bioavailability and bioactivity. *Nat Prod Rep*, 34(12), 1391-1421. doi:10.1039/c7np00030h
- Cortez, N., Villegas, C., Burgos, V., Cabrera-Pardo, J. R., Ortiz, L., González-Chavarría, I., et al. (2024a). Adjuvant Properties of Caffeic Acid in Cancer Treatment. *Int J Mol Sci*, 25(14). doi:10.3390/ijms25147631
- Cortez, N., Villegas, C., Burgos, V., Ortiz, L., Cabrera-Pardo, J. R., & Paz, C. (2024b). Therapeutic Potential of Chlorogenic Acid in Chemoresistance and Chemoprotection in Cancer Treatment. *Int J Mol Sci*, 25(10). doi:10.3390/ijms25105189
- Dejeu, I. L., Vicaș, L. G., Jurca, T., Teușdea, A. C., Mureșan, M. E., Fritea, L., et al. (2021). Liposomes with caffeic acid: Morphological and structural characterisation, their properties and stability in time. *Processes*, 9(6), 912.
- Dobrek, Ł., & Thor, P. J. (2012). Bladder urotoxicity pathophysiology induced by the oxazaphosphorine alkylating agents and its chemoprevention *Postepy Hig Med Dosw (Online)*, 66, 592-602. doi:10.5604/17322693.1009703
- Domitrović, R., Potočnjak, I., Crnčević-Orlić, Z., & Škoda, M. (2014). Nephroprotective activities of rosmarinic acid against cisplatin-induced kidney injury in mice. *Food Chem Toxicol*, 66, 321-328. doi:10.1016/j.fct.2014.02.002
- E Owumi, S., K Olusola, J., O Arunsi, U., & K Oyelere, A. (2021). Chlorogenic acid abates oxido-inflammatory and apoptotic responses in the liver and kidney of Tamoxifen-treated rats. *Toxicology Research*, 10(2), 345-353. doi:10.1093/toxres/tfab002 %J Toxicology Research
- Fraser, C. M., & Chapple, C. (2011). The phenylpropanoid pathway in Arabidopsis. *Arabidopsis Book*, 9, e0152. doi:10.1199/tab.0152
- Gatti, L., & Zunino, F. (2005). Overview of Tumor Cell Chemoresistance Mechanisms. In R. D. Blumenthal (Ed.), *Chemosensitivity: Volume II: In VIVO Models, Imaging, and Molecular Regulators* (pp. 127-148). Totowa, NJ: Humana Press.
- Göçer, H., & Gülçin, I. (2011). Caffeic acid phenethyl ester (CAPE): correlation of structure and antioxidant properties. *Int J Food Sci Nutr*, 62(8), 821-825. doi:10.3109/09637486.2011.585963
- Gorrini, C., Harris, I. S., & Mak, T. W. (2013). Modulation of oxidative stress as an anticancer strategy. *Nat Rev Drug Discov*, 12(12), 931-947. doi:10.1038/nrd4002

- Gui, H., Jin, Y., Lin, A., Wang, P., Wang, Y., & Zhu, H. (2021). Rosmarinic acid relieves cisplatin-induced ovary toxicity in female mice via suppression of oxidative stress and inflammation. *J Biochem Mol Toxicol*, *35*(9), e22839. doi:10.1002/jbt.22839
- Hermansyah, D., Zuhendri, F., Perera, C. O., Firsty, N. N., Chandrasekaran, K., Abdulah, R., et al. (2022). The Potential Use of Propolis as an Adjunctive Therapy in Breast Cancers. *Integr Cancer Ther*, *21*, 15347354221096868. doi:10.1177/15347354221096868
- Huang, L., Chen, J., Quan, J., & Xiang, D. (2021). Rosmarinic acid inhibits proliferation and migration, promotes apoptosis and enhances cisplatin sensitivity of melanoma cells through inhibiting ADAM17/EGFR/AKT/GSK3 β axis. *Bioengineered*, *12*(1), 3065-3076. doi:10.1080/21655979.2021.1941699
- Janssen-Heininger, Y. M., Mossman, B. T., Heintz, N. H., Forman, H. J., Kalyanaraman, B., Finkel, T., et al. (2008). Redox-based regulation of signal transduction: principles, pitfalls, and promises. *Free Radic Biol Med*, *45*(1), 1-17. doi:10.1016/j.freeradbiomed.2008.03.011
- Jena, G., Vikram, A., Tripathi, D. N., & Ramarao, P. (2010). Use of chemoprotectants in chemotherapy and radiation therapy: the challenges of selecting an appropriate agent. *Integr Cancer Ther*, *9*(3), 253-258. doi:10.1177/1534735410376633
- Jeong, H. J., Choi, Y., Kim, M. H., Kang, I. C., Lee, J. H., Park, C., et al. (2011). Rosmarinic acid, active component of Dansam-Eum attenuates ototoxicity of cochlear hair cells through blockage of caspase-1 activity. *PLoS One*, *6*(4), e18815. doi:10.1371/journal.pone.0018815
- Jiang, C., Zhang, T., Gu, J., Shen, C., Gao, H., An, H., et al. (2025). Caffeic Acid Phenethyl Ester Protects Against Doxorubicin-Induced Cardiotoxicity via Inhibiting the ROS-MLKL-Mediated Cross-Talk Between Oxidative Stress and Necroptosis. *Biomolecules*, *15*(6). doi:10.3390/biom15060783
- Kabała-Dzik, A., Rzepecka-Stojko, A., Kubina, R., Jastrzębska-Stojko, Ż., Stojko, R., Wojtyczka, R. D., et al. (2017). Comparison of Two Components of Propolis: Caffeic Acid (CA) and Caffeic Acid Phenethyl Ester (CAPE) Induce Apoptosis and Cell Cycle Arrest of Breast Cancer Cells MDA-MB-231. *Molecules*, *22*(9). doi:10.3390/molecules22091554
- Kang, Z., Li, S., Kang, X., Deng, J., Yang, H., Chen, F., et al. (2023). Phase I study of chlorogenic acid injection for recurrent high-grade glioma with long-term follow-up. *Cancer Biol Med*, *20*(6), 465-476. doi:10.20892/j.issn.2095-3941.2022.0762

- Kleczka, A., Dzik, R., & Kabała-Dzik, A. (2023). Caffeic Acid Phenethyl Ester (CAPE) Synergistically Enhances Paclitaxel Activity in Ovarian Cancer Cells. *Molecules*, 28(15). doi:10.3390/molecules28155813
- Komeili-Movahhed, T., Heidari, F., & Moslehi, A. (2023). Chlorogenic acid alleviated testicular inflammation and apoptosis in tunicamycin induced endoplasmic reticulum stress. *Physiol Int*, 110(1), 19-33. doi:10.1556/2060.2023.00132
- Kurek-Górecka, A., Rzepecka-Stojko, A., Górecki, M., Stojko, J., Sosada, M., & Swierczek-Zieba, G. (2013). Structure and antioxidant activity of polyphenols derived from propolis. *Molecules*, 19(1), 78-101. doi:10.3390/molecules19010078
- Lafay, S., Morand, C., Manach, C., Besson, C., & Scalbert, A. (2006). Absorption and metabolism of caffeic acid and chlorogenic acid in the small intestine of rats. *Br J Nutr*, 96(1), 39-46. doi:10.1079/bjn20061714
- Lei, Z. N., Tian, Q., Teng, Q. X., Wurlpel, J. N. D., Zeng, L., Pan, Y., et al. (2023). Understanding and targeting resistance mechanisms in cancer. *MedComm (2020)*, 4(3), e265. doi:10.1002/mco2.265
- Li, F. R., Fu, Y. Y., Jiang, D. H., Wu, Z., Zhou, Y. J., Guo, L., et al. (2013). Reversal effect of rosmarinic acid on multidrug resistance in SGC7901/Adr cell. *J Asian Nat Prod Res*, 15(3), 276-285. doi:10.1080/10286020.2012.762910
- Liang, L. C., Zhao, L., Yu, B., Hu, H. X., He, X. H., & Zhang, Y. M. (2023). Caffeic acid phenethyl ester reverses doxorubicin resistance in breast cancer cells via lipid metabolism regulation at least partly by suppressing the Akt/mTOR/SREBP1 pathway. *Kaohsiung J Med Sci*, 39(6), 605-615. doi:10.1002/kjm2.12675
- Liao, X. Z., Gao, Y., Sun, L. L., Liu, J. H., Chen, H. R., Yu, L., et al. (2020). Rosmarinic acid reverses non-small cell lung cancer cisplatin resistance by activating the MAPK signaling pathway. *Phytother Res*, 34(5), 1142-1153. doi:10.1002/ptr.6584
- Lim, S. H., Nam, K. H., Kim, K., Yi, S. A., Lee, J., & Han, J. W. (2020). Rosmarinic Acid Methyl Ester Regulates Ovarian Cancer Cell Migration and Reverses Cisplatin Resistance by Inhibiting the Expression of Forkhead Box M1. *Pharmaceuticals (Basel)*, 13(10). doi:10.3390/ph13100302
- Loboda, A., Damulewicz, M., Pyza, E., Jozkowicz, A., & Dulak, J. (2016). Role of Nrf2/HO-1 system in development, oxidative stress response and diseases: an evolutionarily conserved mechanism. *Cell Mol Life Sci*, 73(17), 3221-3247. doi:10.1007/s00018-016-2223-0

- Lukitasari, M., Nugroho, D. A., & Widodo, N. (2018). Chlorogenic Acid: The Conceivable Chemosensitizer Leading to Cancer Growth Suppression. *J Evid Based Integr Med*, 23, 2515690x18789628. doi:10.1177/2515690x18789628
- Ma, Z., Yang, J., Yang, Y., Wang, X., Chen, G., Shi, A., et al. (2020). Rosmarinic acid exerts an anticancer effect on osteosarcoma cells by inhibiting DJ-1 via regulation of the PTEN-PI3K-Akt signaling pathway. *Phytomedicine*, 68, 153186. doi:10.1016/j.phymed.2020.153186
- Mahmoud, M. A., Okda, T. M., Omran, G. A., & Abd-Alhaseeb, M. M. (2021). Rosmarinic acid suppresses inflammation, angiogenesis, and improves paclitaxel induced apoptosis in a breast cancer model via NF3 κB-p53-caspase-3 pathways modulation. *J Appl Biomed*, 19(4), 202-209. doi:10.32725/jab.2021.024
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *Am J Clin Nutr*, 79(5), 727-747. doi:10.1093/ajcn/79.5.727
- McEleny, K., Coffey, R., Morrissey, C., Fitzpatrick, J. M., & Watson, R. W. (2004). Caffeic acid phenethyl ester-induced PC-3 cell apoptosis is caspase-dependent and mediated through the loss of inhibitors of apoptosis proteins. *BJU Int*, 94(3), 402-406. doi:10.1111/j.1464-410X.2004.04936.x
- Meinhart, A. D., Damin, F. M., Caldeirão, L., de Jesus Filho, M., da Silva, L. C., da Silva Constant, L., et al. (2019). Study of new sources of six chlorogenic acids and caffeic acid. *Journal of Food Composition and Analysis*, 82, 103244. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103244
- Mirzaei, S., Gholami, M. H., Zabolian, A., Saleki, H., Farahani, M. V., Hamzehlou, S., et al. (2021). Caffeic acid and its derivatives as potential modulators of oncogenic molecular pathways: New hope in the fight against cancer. *Pharmacol Res*, 171, 105759. doi:10.1016/j.phrs.2021.105759
- Nam, K. H., Yi, S. A., Nam, G., Noh, J. S., Park, J. W., Lee, M. G., et al. (2019). Identification of a novel S6K1 inhibitor, rosmarinic acid methyl ester, for treating cisplatin-resistant cervical cancer. *BMC Cancer*, 19(1), 773. doi:10.1186/s12885-019-5997-2
- Omene, C., Kalac, M., Wu, J., Marchi, E., Frenkel, K., & O'Connor, O. A. (2013). Propolis and its Active Component, Caffeic Acid Phenethyl Ester (CAPE), Modulate Breast Cancer Therapeutic Targets via an Epigenetically Mediated Mechanism of Action. *J Cancer Sci Ther*, 5(10), 334-342.

- Pérez, R., Burgos, V., Marín, V., Camins, A., Olloquequi, J., González-Chavarría, I., et al. (2023). Caffeic Acid Phenethyl Ester (CAPE): Biosynthesis, Derivatives and Formulations with Neuroprotective Activities. *Antioxidants (Basel)*, 12(8). doi:10.3390/antiox12081500
- Prades-Sagarra, E., Laarakker, F., Dissy, J., Lieuwes, N. G., Biemans, R., Dubail, M., et al. (2024). Caffeic Acid Phenethyl Ester (CAPE), a natural polyphenol to increase the therapeutic window for lung adenocarcinomas. *Radiother Oncol*, 190, 110021. doi:10.1016/j.radonc.2023.110021
- Qu, S., Dai, C., Hao, Z., Tang, Q., Wang, H., Wang, J., et al. (2020). Chlorogenic acid prevents vancomycin-induced nephrotoxicity without compromising vancomycin antibacterial properties. *Phytother Res*, 34(12), 3189-3199. doi:10.1002/ptr.6765
- Radziejewska, I., Supruniuk, K., & Bielawska, A. (2021). Anti-cancer effect of combined action of anti-MUC1 and rosmarinic acid in AGS gastric cancer cells. *Eur J Pharmacol*, 902, 174119. doi:10.1016/j.ejphar.2021.174119
- Rahman, M. A., Hannan, M. A., Dash, R., Rahman, M. H., Islam, R., Uddin, M. J., et al. (2021). Phytochemicals as a Complement to Cancer Chemotherapy: Pharmacological Modulation of the Autophagy-Apoptosis Pathway. *Front Pharmacol*, 12, 639628. doi:10.3389/fphar.2021.639628
- Ranjbary, A. G., Bagherzadeh, A., Sabbaghi, S. S., Faghihi, A., Karimi, D. N., Naji, S., et al. (2023). Chlorogenic acid induces apoptosis and cell-cycle arrest in colorectal cancer cells. *Mol Biol Rep*, 50(12), 9845-9857. doi:10.1007/s11033-023-08854-y
- Refolo, M. G., Lippolis, C., Carella, N., Cavallini, A., Messa, C., & D'Alessandro, R. (2018). Chlorogenic Acid Improves the Regorafenib Effects in Human Hepatocellular Carcinoma Cells. *Int J Mol Sci*, 19(5). doi:10.3390/ijms19051518
- Ren, X., Ren, J., Li, Y., Yuan, S., & Wang, G. (2023). Preparation of caffeic acid grafted chitosan self-assembled micelles to enhance oral bioavailability and antibacterial activity of quercetin. *Front Vet Sci*, 10, 1218025. doi:10.3389/fvets.2023.1218025
- Salzillo, A., Ragone, A., Spina, A., Naviglio, S., & Sapio, L. (2021). Chlorogenic Acid Enhances Doxorubicin-Mediated Cytotoxic Effect in Osteosarcoma Cells. *Int J Mol Sci*, 22(16). doi:10.3390/ijms22168586
- Saray, E. A., Azadmard-Damirchi, S., & Gharekhani, M. (2022). Combination therapy against breast cancer cells by docetaxel with rosmarinic and thymoquinone: an experimental study.

- Schumacker, P. T. (2006). Reactive oxygen species in cancer cells: live by the sword, die by the sword. *Cancer Cell*, 10(3), 175-176. doi:10.1016/j.ccr.2006.08.015
- Selmin, F., Puoci, F., Parisi, O. I., Franzé, S., Musazzi, U. M., & Cilurzo, F. (2015). Caffeic Acid-PLGA Conjugate to Design Protein Drug Delivery Systems Stable to Irradiation. *J Funct Biomater*, 6(1), 1-13. doi:10.3390/jfb6010001
- Şengelen, A., & Önay-Uçar, E. (2024). Rosmarinic acid attenuates glioblastoma cells and spheroids' growth and EMT/stem-like state by PTEN/PI3K/AKT downregulation and ERK-induced apoptosis. *Phytomedicine*, 135, 156060. doi:10.1016/j.phymed.2024.156060
- Shekarchi, M., Hajimehdipoor, H., Saeidnia, S., Gohari, A. R., & Hamedani, M. P. (2012). Comparative study of rosmarinic acid content in some plants of Labiatae family. *Pharmacogn Mag*, 8(29), 37-41. doi:10.4103/0973-1296.93316
- Sies, H. (2015). Oxidative stress: a concept in redox biology and medicine. *Redox Biol*, 4, 180-183. doi:10.1016/j.redox.2015.01.002
- Sirota, R., Gibson, D., & Kohen, R. (2015). The role of the catecholic and the electrophilic moieties of caffeic acid in Nrf2/Keap1 pathway activation in ovarian carcinoma cell lines. *Redox Biol*, 4, 48-59. doi:10.1016/j.redox.2014.11.012
- Sova, M., & Saso, L. (2020). Natural Sources, Pharmacokinetics, Biological Activities and Health Benefits of Hydroxycinnamic Acids and Their Metabolites. *Nutrients*, 12(8). doi:10.3390/nu12082190
- Stanciauskaite, M., Poskute, M., Kurapkiene, V., Marksa, M., Jakstas, V., Ivanauskas, L., et al. (2023). Optimization of Delivery and Bioavailability of Encapsulated Caffeic Acid. *Foods*, 12(10). doi:10.3390/foods12101993
- Taniguchi, K., & Karin, M. (2018). NF- κ B, inflammation, immunity and cancer: coming of age. *Nat Rev Immunol*, 18(5), 309-324. doi:10.1038/nri.2017.142
- Teng, Y. N., Wang, C. C. N., Liao, W. C., Lan, Y. H., & Hung, C. C. (2020). Caffeic Acid Attenuates Multi-Drug Resistance in Cancer Cells by Inhibiting Efflux Function of Human P-glycoprotein. *Molecules*, 25(2). doi:10.3390/molecules25020247
- Tinoush, B., Shirdel, I., & Wink, M. (2020). Phytochemicals: Potential Lead Molecules for MDR Reversal. *Front Pharmacol*, 11, 832. doi:10.3389/fphar.2020.00832

- Tolba, M. F., Esmat, A., Al-Abd, A. M., Azab, S. S., Khalifa, A. E., Mosli, H. A., et al. (2013). Caffeic acid phenethyl ester synergistically enhances docetaxel and paclitaxel cytotoxicity in prostate cancer cells. *IUBMB Life*, 65(8), 716-729. doi:10.1002/iub.1188
- Trócsányi, E., György, Z., & Zámboriné-Németh, É. (2020). New insights into rosmarinic acid biosynthesis based on molecular studies. *Current Plant Biology*, 23, 100162. doi:https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100162
- Tseng, J. C., Lin, C. Y., Su, L. C., Fu, H. H., Yang, S. D., & Chuu, C. P. (2016). CAPE suppresses migration and invasion of prostate cancer cells via activation of non-canonical Wnt signaling. *Oncotarget*, 7(25), 38010-38024. doi:10.18632/oncotarget.9380
- Villegas, C., Cortez, N., Ogundele, A. V., Burgos, V., Pardi, P. C., Cabrera-Pardo, J. R., et al. (2024). Therapeutic Applications of Rosmarinic Acid in Cancer-Chemotherapy-Associated Resistance and Toxicity. *Biomolecules*, 14(7). doi:10.3390/biom14070867
- Vogt, T. (2010). Phenylpropanoid biosynthesis. *Mol Plant*, 3(1), 2-20. doi:10.1093/mp/ssp106
- Wu, J., Li, Y., He, Q., & Yang, X. (2023). Exploration of the Use of Natural Compounds in Combination with Chemotherapy Drugs for Tumor Treatment. *Molecules*, 28(3). doi:10.3390/molecules28031022
- Wu, J., Omene, C., Karkoszka, J., Bosland, M., Eckard, J., Klein, C. B., et al. (2011). Caffeic acid phenethyl ester (CAPE), derived from a honeybee product propolis, exhibits a diversity of anti-tumor effects in pre-clinical models of human breast cancer. *Cancer Lett*, 308(1), 43-53. doi:10.1016/j.canlet.2011.04.012
- Xiang, Y., Ji, M., Wu, L., Lv, L., Liang, Q., Deng, R., et al. (2022). Rosmarinic Acid Prevents Cisplatin-Induced Liver and Kidney Injury by Inhibiting Inflammatory Responses and Enhancing Total Antioxidant Capacity, Thereby Activating the Nrf2 Signaling Pathway. *Molecules*, 27(22). doi:10.3390/molecules27227815
- Xiao, Q., Zhu, W., Feng, W., Lee, S. S., Leung, A. W., Shen, J., et al. (2018). A Review of Resveratrol as a Potent Chemoprotective and Synergistic Agent in Cancer Chemotherapy. *Front Pharmacol*, 9, 1534. doi:10.3389/fphar.2018.01534
- Yagmurca, M., Erdogan, H., Iraz, M., Songur, A., Ucar, M., & Fadillioglu, E. (2004). Caffeic acid phenethyl ester as a protective agent against doxorubicin nephrotoxicity in rats. *Clin Chim Acta*, 348(1-2), 27-34. doi:10.1016/j.cccn.2004.03.035

- Yan, Y., Li, J., Han, J., Hou, N., Song, Y., & Dong, L. (2015). Chlorogenic acid enhances the effects of 5-fluorouracil in human hepatocellular carcinoma cells through the inhibition of extracellular signal-regulated kinases. *Anticancer Drugs*, 26(5), 540-546. doi:10.1097/cad.0000000000000218
- Yin, X., He, X., Wu, L., Yan, D., & Yan, S. (2022). Chlorogenic Acid, the Main Antioxidant in Coffee, Reduces Radiation-Induced Apoptosis and DNA Damage via NF-E2-Related Factor 2 (Nrf2) Activation in Hepatocellular Carcinoma. *Oxid Med Cell Longev*, 2022, 4566949. doi:10.1155/2022/4566949
- Yu, C., Chen, D. Q., Liu, H. X., Li, W. B., Lu, J. W., & Feng, J. F. (2019). Rosmarinic acid reduces the resistance of gastric carcinoma cells to 5-fluorouracil by downregulating FOXO4-targeting miR-6785-5p. *Biomed Pharmacother*, 109, 2327-2334. doi:10.1016/j.biopha.2018.10.061
- Zilfou, J. T., & Lowe, S. W. (2009). Tumor suppressive functions of p53. *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 1(5), a001883. doi:10.1101/cshperspect.a001883

DIABETES MELLITUS: MECANISMOS EPIGENÉTICOS Y TERAPIAS NATURALES¹⁹

DIABETES MELLITUS: EPIGENETIC MECHANISMS AND NATURAL THERAPIES

77

Cristian Paz²⁰

Muhammad Javid Iqbal²¹

Revisores pares: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.²²

¹⁹ Derivado del proyecto de investigación: Diabetes Mellitus: Mecanismos epigenéticos y terapias naturales.

²⁰ Natural Products & Drug Discovery, Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Medicina, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, Chile, correo electrónico: cristian.paz@ufrontera.cl (C.P.)

²¹ m.iqbal@ufromail.cl

²² Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

La diabetes mellitus se ha convertido en una crisis sanitaria mundial que afecta actualmente a más de 537 millones de personas, con proyecciones que alcanzarán los 783 millones para 2045. Más allá de la desregulación de la glucosa, la diabetes implica mecanismos epigenéticos complejos que alteran la expresión génica sin modificar la secuencia subyacente del ADN. Este capítulo explora cómo las células β pancreáticas —reguladoras clave de la homeostasis de la glucosa— pierden gradualmente su función debido al silenciamiento epigenético de genes metabólicos esenciales, impulsado principalmente por la actividad desregulada de la ADN metiltransferasa 1 (DNMT1) y la histona desacetilasa 3 (HDAC3). Un concepto fundamental que se analiza es la "memoria metabólica", donde la hiperglucemia prolongada imprime cambios epigenéticos duraderos que persisten incluso después de la normalización de los niveles de glucosa en sangre, lo que contribuye al desarrollo continuo de complicaciones diabéticas a pesar del tratamiento. Se destacan las limitaciones de las terapias sintéticas convencionales, en particular su incapacidad para abordar estos factores epigenéticos y su asociación con efectos adversos como el malestar gastrointestinal y la toxicidad hematológica. Por el contrario, los compuestos bioactivos naturales ofrecen una alternativa prometedora. Fitoquímicos como la quercetina, el EGCG y la curcumina presentan una doble acción: modulan tanto los reguladores epigenéticos como las enzimas que digieren carbohidratos, como la α -amilasa y la α -glucosidasa. Al abordar tanto los desequilibrios metabólicos inmediatos como las alteraciones a largo plazo de la expresión génica, estos compuestos proporcionan una estrategia holística para el manejo de la diabetes. Este enfoque integral representa un cambio de paradigma hacia terapias que abordan las causas moleculares fundamentales de la diabetes, en lugar de limitarse a controlar sus síntomas.

PALABRAS CLAVE: Diabetes mellitus, Modificaciones epigenéticas, Memoria metabólica, DNMT1, HDAC3, Disfunción de las células β , Compuestos bioactivos naturales, Inhibidores de la α -glucosidasa.

ABSTRACT

Diabetes mellitus has become a global health crisis, currently affecting over 537 million people, with projections reaching 783 million by 2045. Beyond glucose dysregulation, diabetes involves complex epigenetic mechanisms that alter gene expression without changing the underlying DNA sequence. This chapter explores how pancreatic β -cells—key regulators of glucose homeostasis—gradually lose function due to epigenetic silencing of essential metabolic genes, driven largely by dysregulated activity of DNA methyltransferase 1 (DNMT1) and histone deacetylase 3 (HDAC3). A pivotal concept discussed is "metabolic memory," where prolonged hyperglycemia imprints lasting epigenetic changes that persist even after blood glucose levels are normalized, contributing to the ongoing development of diabetic complications despite treatment. The limitations of conventional synthetic therapies are highlighted, particularly their inability to address these epigenetic drivers and their association with adverse effects such as gastrointestinal distress and hematologic toxicity. In contrast, natural bioactive compounds offer a promising alternative. Phytochemicals such as quercetin, EGCG, and curcumin exhibit dual actions—modulating both epigenetic regulators and carbohydrate-digesting enzymes like α -amylase and α -glucosidase. By targeting both immediate metabolic imbalances and long-term gene expression alterations, these compounds provide a holistic strategy for diabetes management. This integrative approach represents a paradigm shift toward therapies that address the root molecular causes of diabetes rather than solely managing its symptoms.

Keywords: Diabetes mellitus, Epigenetic modifications, Metabolic memory, DNMT1, HDAC3, β -cell dysfunction, Natural bioactive compounds, α -glucosidase inhibitors.

INTRODUCCIÓN

El problema mundial de la diabetes

La diabetes mellitus se ha convertido en uno de los problemas de salud más graves que enfrenta el mundo hoy en día. Un estudio de la Federación Internacional de Diabetes muestra que más de 537 millones de personas viven actualmente con diabetes y los científicos predicen que esta cifra alcanzará los 783 millones para 2045. (Hossain et al., 2024) Este drástico aumento representa un enorme desafío para los sistemas de salud a nivel mundial, ya que la diabetes causa 6,7 millones de muertes al año aproximadamente, lo que la convierte en una de las principales causas de muerte a nivel mundial (Wagh et al., 2025).

La enfermedad afecta la forma en que nuestro cuerpo procesa el azúcar y mantiene un equilibrio energético adecuado, lo que provoca complicaciones graves que afectan el corazón, los riñones, los ojos y el sistema nervioso. Diversos factores contribuyen al desarrollo de la diabetes mediante una compleja interacción entre la predisposición genética, los factores ambientales, el estilo de vida y las modificaciones epigenéticas (**Figura 1**). Si bien los antecedentes familiares desempeñan un papel crucial, factores modificables como la falta de ejercicio, la obesidad y los hábitos alimentarios poco saludables aumentan significativamente el riesgo de padecer la enfermedad, junto con factores ambientales como la urbanización, el estrés y la exposición a sustancias químicas (Sami et al., 2025). Los países latinoamericanos enfrentan situaciones particularmente difíciles con respecto a la diabetes, con tasas más altas en comparación con los promedios mundiales. México lidera la lista con un 16,9 % de adultos afectados, mientras que Chile (9,3 %), Brasil (7,7 %) y Argentina (6,6 %).

El impacto económico va mucho más allá de los costos de la atención médica: el gasto mundial en atención relacionado con la diabetes alcanzó los 966 000 millones de dólares en 2021, lo que representa un aumento del 316 % en 15 años. Esta carga supone un desafío especial para los países en desarrollo con recursos sanitarios limitados (P. Zhang & Gregg, 2017). Investigaciones recientes han revelado que la diabetes implica más que problemas de control de la glucemia. Los científicos han descubierto que los cambios epigenéticos en la expresión génica desempeñan un papel crucial en el desarrollo y la progresión de la enfermedad, lo que abre nuevas perspectivas sobre por qué la diabetes sigue siendo difícil de

tratar y por qué las complicaciones persisten incluso después de la normalización de la glucosa (Ling & Rönn, 2019).

Las poblaciones indígenas de Latinoamérica enfrentan tasas de diabetes particularmente altas. Se ha reportado que algunas comunidades presentan tasas de diabetes superiores al 42,7 % (Garza & Abascal Miguel, 2025). Los investigadores sugieren que estas poblaciones presentan cambios genéticos que ayudaron a sus ancestros a sobrevivir en épocas de escasez de alimentos, pero estos mismos cambios genéticos aumentan el riesgo de diabetes cuando las personas se exponen a dietas modernas hipercalóricas (Burrow et al., 2023) (L et al., 2019).

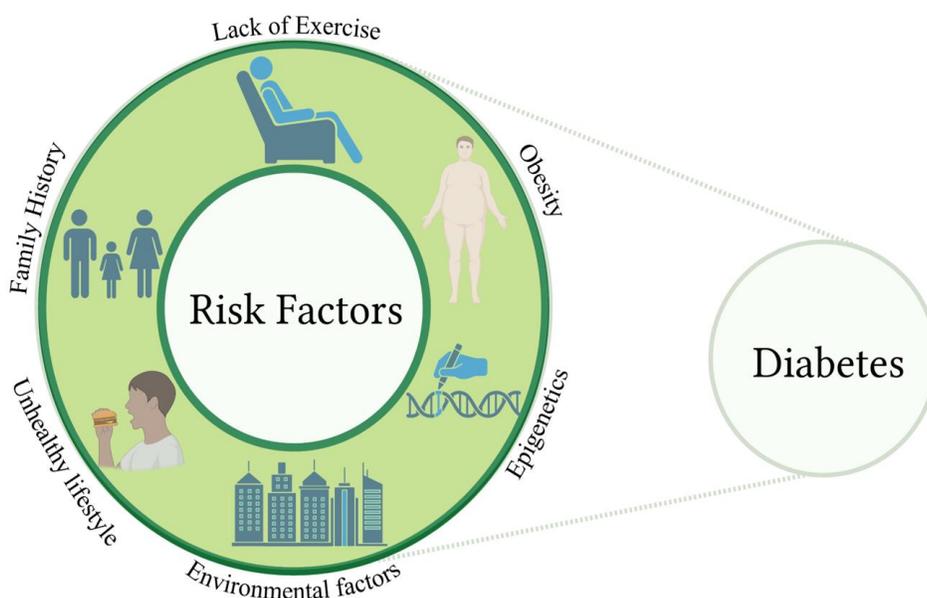


Figura 1. Red multifactorial de factores de riesgo de diabetes, que incluye predisposición genética (antecedentes familiares), sedentarismo, obesidad, alteraciones epigenéticas, hábitos poco saludables e influencias ambientales. Estos factores interactúan sinérgicamente, contribuyendo a la aparición de la diabetes.

Tipos y formas de diabetes

La diabetes mellitus abarca diversas afecciones distintas que se caracterizan por niveles elevados de glucosa en sangre, clasificadas como diabetes tipo 1 (DM1), diabetes tipo 2 (DM2), diabetes gestacional y formas específicas causadas por defectos genéticos o afecciones médicas. Comprender estas clasificaciones es crucial, ya que cada tipo implica

diferentes mecanismos moleculares que afectan a diversos procesos celulares y sistemas orgánicos, lo que requiere enfoques terapéuticos personalizados (Banday et al., 2020).

La diabetes tipo 1 se produce cuando el sistema inmunitario ataca y destruye por error las células beta pancreáticas, lo que provoca una deficiencia completa de insulina y una dependencia insulínica de por vida. La diabetes tipo 1 representa entre el 5 % y el 10 % de los casos de diabetes y se desarrolla típicamente en niños y adultos jóvenes mediante interacciones complejas entre factores genéticos y desencadenantes ambientales. Los científicos han identificado más de 50 loci genéticos que contribuyen al riesgo de diabetes tipo 1, con las asociaciones más fuertes en genes relacionados con el sistema inmunitario. Factores ambientales como las infecciones víricas, los componentes dietéticos, la deficiencia de vitamina D y la menor exposición a microbios en las primeras etapas de la vida pueden desencadenar procesos autoinmunes en individuos genéticamente susceptibles. La progresión de la enfermedad sigue un patrón predecible desde la aparición de autoanticuerpos hasta la pérdida progresiva de insulina y los síntomas clínicos (Copenhaver & Hoffman, 2017).

La diabetes tipo 2 representa el 90-95% de los casos y se desarrolla a través de la resistencia a la insulina combinada con una insuficiencia progresiva de las células beta. A diferencia de la diabetes tipo 1, la diabetes tipo 2 se desarrolla gradualmente a lo largo de los años, con fuertes vínculos con el estilo de vida. Múltiples sistemas corporales se vuelven resistentes a la insulina, lo que obliga a la compensación pancreática hasta que las células beta se agotan. Los factores de riesgo incluyen la obesidad, la inactividad física, los antecedentes familiares, la edad avanzada y ciertas etnias. Su naturaleza progresiva a menudo requiere un tratamiento intensivo con el tiempo. Investigaciones recientes revelan cambios significativos en la expresión génica que afectan a múltiples tejidos, lo que contribuye a la memoria metabólica, donde las complicaciones persisten a pesar de la normalización de la glucosa. La disfunción del tejido adiposo desempeña un papel crucial, ya que las células grasas agrandadas liberan sustancias inflamatorias que promueven la resistencia sistémica a la insulina, creando ciclos que se autoperpetúan (Galicia-Garcia et al., 2020a).

La diabetes gestacional afecta al 6-7% de los embarazos a nivel mundial, como resultado de las hormonas del embarazo que aumentan la resistencia a la insulina. Si bien la mayoría

de las mujeres compensan esta situación mediante una mayor producción de insulina, aquellas que no pueden hacerlo desarrollan diabetes gestacional. Otras formas de diabetes incluyen la diabetes monogénica, como MODY y la diabetes neonatal, causada por mutaciones de un solo gen que afectan la función de las células beta o la acción de la insulina. Estas formas raras brindan información importante sobre la regulación del metabolismo de la glucosa. Los recientes avances en las pruebas genéticas han mejorado la precisión de la clasificación de la diabetes, lo que permite estrategias de tratamiento más personalizadas (Nakshine & Jogdand, 2023).

Células β pancreáticas: los sensores de glucosa del cuerpo

3.1 Cómo funcionan normalmente las células β

Basándose en la compleja fisiopatología de los diferentes tipos de diabetes, descrita anteriormente, comprender la función de las células β pancreáticas resulta crucial para entender cómo las modificaciones epigenéticas alteran la homeostasis de la glucosa. Las células β pancreáticas actúan como sensores de glucosa y fábricas de insulina del organismo, representando entre el 60 % y el 80 % de las áreas productoras de insulina en el páncreas y desempeñando un papel crucial en el mantenimiento de niveles normales de glucosa en sangre a lo largo del día (Singh et al., 2024).

El proceso mediante el cual las células β responden al aumento de los niveles de glucosa en sangre se denomina secreción de insulina estimulada por glucosa (GSIS). Este sofisticado sistema comienza cuando la glucosa entra en la célula β a través de transportadores de glucosa GLUT2 especializados y es fosforilada por la glucoquinasa, que actúa como el principal sensor de glucosa debido a sus propiedades cinéticas únicas que permiten una respuesta proporcional a las concentraciones fisiológicas de glucosa (Im et al., 2005). La vía glucolítica resultante aumenta la producción de ATP a través del metabolismo mitocondrial, lo que provoca el cierre de los canales de potasio sensibles al ATP y la despolarización de la membrana. Posteriormente, se abren los canales de calcio dependientes del voltaje, lo que permite la entrada de calcio que desencadena la exocitosis de los gránulos que contienen insulina (Sun et al., 2023).

Este elegante sistema garantiza que la secreción de insulina coincida estrechamente con los niveles de glucosa en sangre y la sensibilidad a la glucosa depende críticamente de las propiedades únicas de la glucoquinasa, que incluyen una K_m alta para la glucosa y la falta de inhibición del producto (Hatting et al., 2018). El funcionamiento adecuado de las células β depende de factores de transcripción específicos que mantienen sus características especializadas y su capacidad de respuesta a la glucosa. Los reguladores clave incluyen PDX-1 (homeobox-1 pancreático y duodenal), MafA y NeuroD1, que coordinan la expresión de genes esenciales para la identidad de las células β y la capacidad de respuesta a la glucosa. PDX-1 actúa como un regulador maestro que controla tanto el desarrollo de las células β como la función madura, mientras que MafA regula específicamente la transcripción del gen de la insulina en respuesta a la glucosa (Liu et al., 2021).

Las células β contienen una sofisticada maquinaria para la producción, el procesamiento y el almacenamiento de insulina. La insulina se sintetiza inicialmente como preproinsulina, sometiéndose a un procesamiento secuencial en el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi para producir insulina madura, que posteriormente se empaqueta en gránulos secretores con múltiples mecanismos de control de calidad que garantizan un plegamiento y procesamiento adecuados (Hoehn et al., 2008). La regulación de la expresión génica de la insulina implica interacciones complejas entre la glucosa, las hormonas y los factores de transcripción. Las secuencias reguladoras que se unen a PDX-1, MafA y Beta2 actúan sinérgicamente para controlar la producción de insulina según las demandas metabólicas y permitir que las células β adapten su capacidad de producción de insulina a las condiciones fisiológicas cambiantes (KANETO et al., 2008).

3.2 Problemas de las células β en la diabetes

En la diabetes, las células β pierden gradualmente su capacidad de funcionar correctamente mediante procesos que implican tanto la muerte celular como un proceso llamado desdiferenciación. La desdiferenciación significa que las células β maduras pierden sus características especializadas, aunque potencialmente permanecen vivas. Este descubrimiento, tiene importantes implicaciones para el desarrollo de nuevos tratamientos (Galicia-Garcia et al., 2020a).

Los niveles elevados de glucosa (glucotoxicidad) y de grasa (lipotoxicidad) representan los principales mecanismos que dañan las células β . Estas condiciones generan estrés oxidativo, modifican las proteínas celulares y alteran los procesos celulares normales. La combinación de toxicidad por glucosa y grasa, denominada glucolipotoxicidad, es particularmente dañina y acelera el deterioro de las células β (Galicia-García et al., 2020b).

Los procesos inflamatorios contribuyen a que las células inmunitarias penetran en las zonas pancreáticas y liberan sustancias inflamatorias que dañan las células β e interfieren en su función (Hudish et al., 2019). Además, la hiperglucemia y el estrés oxidativo pueden activar enzimas epigenéticas dañinas como DNMT1 y HDAC3, que silencian genes importantes de las células β , creando un círculo vicioso donde el estrés metabólico provoca cambios epigenéticos que deterioran aún más la función de las células β (Y. K. Kim et al., 2024).

Investigaciones recientes que emplean técnicas avanzadas para estudiar células individuales han revelado que no todas las células β responden de la misma manera a la diabetes. Algunas células β sufren desdiferenciación, perdiendo sus características productoras de insulina y potencialmente adoptando características de otros tipos de células pancreáticas. Los investigadores sugieren que este proceso podría ser reversible en las condiciones adecuadas, lo que ofrece esperanza para nuevos enfoques terapéuticos (Hao & Liu, 2023).

El estrés celular desempeña un papel crucial en la disfunción de las células β . Cuando la demanda de producción de insulina es demasiada, la maquinaria celular se estresa y activa vías que pueden ayudar a la célula a recuperarse o desencadenar su muerte. Investigadores han reportado que el estrés celular crónico es un factor importante en la insuficiencia de las células β en la diabetes (W.-B. Chen et al., 2016b).

La **Tabla 1** muestra cómo diversos genes importantes para la función de las células β se modifican en la diabetes mediante cambios epigenéticos. Estas modificaciones afectan a genes implicados en la producción de insulina (INS), la identidad de las células β (PDX1, MafA), la detección de glucosa (GLUT2, GCK) y la función celular (FOXO1, NeuroD1).

Tabla 1: Cambios en la expresión genética de las células β durante la diabetes.

Gen/Proteína	Función normal	Cambios en la diabetes	Tipo de modificación	Resultado
INS (insulina)	Regulación de la glucosa	Expresión reducida	metilación del ADN	Menor producción de insulina
PDX1	identidad de las células β	Silenciamiento	Modificaciones de histonas	Pérdida de las características de las células β
GLUT2	Transporte de glucosa	Disminución de la expresión	Cambios en la cromatina	Mala detección de glucosa
GCK (glucoquinasa)	Sensor de glucosa	Actividad reducida	Modificaciones de proteínas	Detección de glucosa alterada
FOXO1	Regulación metabólica	Sobreactivación	Acetilación alterada	disfunción de las células β
MafA	maduración de las células β	Supresión	Silenciamiento epigenético	Pérdida de las características de las células β maduras
NeuroD1	desarrollo de las células β	Actividad reducida	Desacetilación de histonas	Disminución de los marcadores de células β

Cambios epigenéticos en la diabetes

¿Qué son los cambios epigenéticos?

La epigenética se refiere a los cambios en la actividad genética que ocurren sin alterar la secuencia de ADN. Estas modificaciones actúan como interruptores que activan o desactivan los genes, permitiendo que las células respondan a los cambios ambientales manteniendo sus características específicas. En el caso de la diabetes, los investigadores han descubierto que las modificaciones epigenéticas desempeñan un papel crucial en el desarrollo, la progresión y las complicaciones de la enfermedad (Tompkins, 2022), (Fasolino et al., 2020).

Los principales tipos de modificaciones epigenéticas incluyen la metilación del ADN, las modificaciones de histonas, la remodelación de la cromatina y la regulación por ARN no codificantes. Estos sistemas trabajan en conjunto para controlar qué genes están activos en diferentes tipos de células y en diferentes condiciones. A diferencia de las mutaciones genéticas, los científicos han informado que los cambios epigenéticos son potencialmente reversibles, lo que ofrece oportunidades para nuevos tratamientos (Srinivasan, 2011).

La metilación del ADN generalmente implica la adición de pequeños grupos químicos llamados grupos metilo a ciertas partes del ADN, lo que suele provocar el silenciamiento

génico cuando ocurre en las regiones de control. Las modificaciones de las histonas implican cambios químicos en las proteínas que envuelven el ADN, lo que afecta la densidad del empaquetamiento del ADN y la posibilidad de acceder a los genes para su actividad (Laranjeira et al., 2023).

El descubrimiento de que las condiciones metabólicas pueden influir en los patrones epigenéticos ha cambiado la comprensión científica de la diabetes. Los niveles elevados de glucosa, la inflamación y el estrés oxidativo pueden alterar las modificaciones epigenéticas y cambiar los patrones de expresión génica, lo que a su vez prolonga el proceso de la enfermedad (Caturano et al., 2023).

Memoria metabólica: cuando los malos cambios perduran

Uno de los descubrimientos más importantes en la investigación de la diabetes es lo que los científicos denominan "memoria metabólica". Esto se refiere a la persistencia de las complicaciones diabéticas incluso después de que los niveles de glucosa en sangre se normalicen. Los investigadores han descubierto que la base molecular de este fenómeno reside en cambios epigenéticos estables que se establecen durante períodos de control deficiente de la glucosa (Dong et al., 2024). Si bien los niveles altos de glucosa causan modificaciones epigenéticas reversibles, al avanzar la enfermedad, la modificación del ADN lleva a cambios más permanentes incluso cuando se elimina el factor desencadenante original (niveles altos de glucosa) (El Ouaamari et al., 2008).

En los tejidos diabéticos también se producen cambios a gran escala en la organización cromosómica, que afectan la interacción de los genes con sus elementos de control. Estos cambios crean entornos celulares que permanecen preparados para las respuestas diabéticas incluso después de que los niveles de glucosa se normalicen, lo que explica por qué el control intensivo temprano de la glucosa tiene beneficios duraderos en la prevención de complicaciones (Srinivasan, 2011).

La importancia clínica de la memoria metabólica se demostró por primera vez en importantes ensayos sobre diabetes. El Ensayo sobre el Control y las Complicaciones de la Diabetes (DCCT) demostró que los pacientes con un control intensivo temprano de la glucosa

presentaron menos complicaciones durante años tras la finalización del ensayo, incluso cuando su control de la glucosa se igualó al del grupo control (Nathan, 2014).

Los productos finales de la glicación avanzada (AGE), que se forman cuando las proteínas reaccionan con la glucosa en condiciones de alta concentración de glucosa, desempeñan un papel importante en el establecimiento de la memoria metabólica. Los AGE activan vías celulares que promueven cambios epigenéticos, creando alteraciones persistentes en la expresión génica que mantienen las características diabéticas (Tobon-Velasco et al., 2014).

ADN metiltransferasa 1 (DNMT1): la enzima de metilación

La DNMT1 normalmente mantiene los patrones de metilación del ADN durante la división celular. Sin embargo, en la diabetes, los investigadores han descubierto que esta enzima se recluta de forma inapropiada en las regiones de control de genes metabólicos, donde establece patrones dañinos que silencian genes importantes para el manejo normal de la glucosa y la señalización de la insulina (T. Chen et al., 2024).

Los productos finales de la glicación avanzada (AGE), que se forman cuando las proteínas reaccionan con azúcares en condiciones de alta glucosa, activan directamente las vías de señalización que aumentan la expresión y la actividad de DNMT1. El estrés oxidativo, otra consecuencia de la alta glucosa, crea modificaciones en el empaquetamiento del ADN que sirven como plataformas de reclutamiento para DNMT1 (Tobon-Velasco et al., 2014), **Figura 2.**

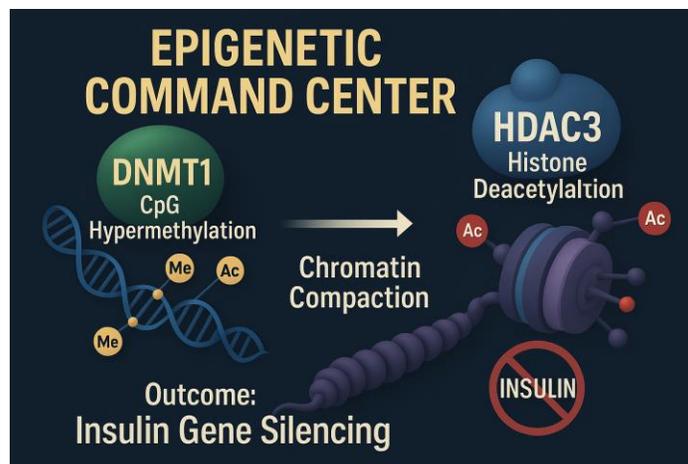


Figura 2. Regulación epigenética de la expresión génica de la insulina. DNMT1 media la hipermetilación de CpG y HDAC3 induce la desacetilación de histonas, lo que provoca la compactación de la cromatina. Esta represión epigenética coordinada silencia el gen de la insulina, lo que contribuye a la disfunción de las células β en la diabetes.

El gen de la insulina constituye el ejemplo más claro del silenciamiento génico mediado por DNMT1 en la diabetes. En condiciones normales, la región de control del gen de la insulina contiene patrones químicos que permiten que las proteínas reguladoras se unan y activen la expresión de insulina en respuesta a la glucosa. Cuando DNMT1 modifica estas regiones, las proteínas reguladoras dejan de unirse y la expresión de insulina se ve gravemente afectada (Camacho et al., 2025).

Las investigaciones han demostrado que la actividad de DNMT1 aumenta en diversos tejidos de pacientes y animales diabéticos, incluyendo las áreas pancreáticas, los riñones y los vasos sanguíneos. Este aumento de actividad se correlaciona con el silenciamiento de genes beneficiosos y el desarrollo de complicaciones diabéticas (Huang et al., 2024). Además, el reclutamiento de DNMT1 a regiones específicas de control génico implica interacciones complejas con otras enzimas epigenéticas y proteínas modificadoras del ADN (Bashtrykov et al., 2014).

4.4 Histona desacetilasa 3 (HDAC3): un controlador metabólico clave

La HDAC3 pertenece a una familia de enzimas que eliminan grupos químicos llamados grupos acetilo de las histonas y otras proteínas celulares. A diferencia de otros miembros de

su familia, los investigadores han descubierto que la HDAC3 participa en las vías metabólicas (Xu et al., 2017) y modifica proteínas reguladoras clave, como, por ejemplo, FOXO1, una proteína reguladora que promueve la producción de glucosa. En condiciones normales, FOXO1 permanece inactivo, pero los cambios mediados por HDAC3 lo activan, lo que provoca un aumento de la producción de glucosa y una reducción de la sensibilidad a la insulina (Teaney & Cyr, 2023).

PDX-1, el regulador principal de la identidad de las células β , representa otro objetivo crítico de HDAC3. Cuando HDAC3 modifica PDX-1, reduce la actividad de la proteína reguladora y promueve su degradación. Esto produce efectos en cascada sobre la expresión génica de las células β y contribuye a la pérdida progresiva de la función de estas células, observada en la diabetes (Liu et al., 2021).

La **Figura 3** muestra la distribución celular de las diferentes clases de HDAC y sus ubicaciones específicas dentro de las células, ya que tienen ubicaciones celulares y requerimientos de cofactores distintos, lo que determina sus funciones específicas en la regulación génica y el control metabólico.

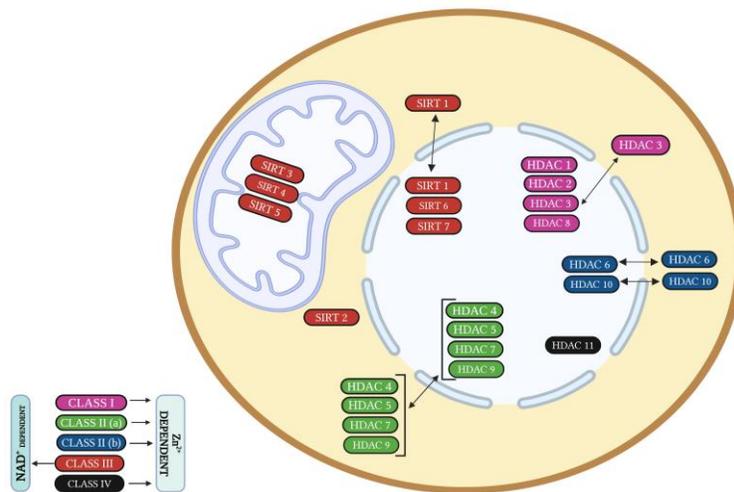


Figura 3. Localización celular de las clases de HDAC. Las HDAC de clase I (1, 2, 3, 8) son nucleares; las de clase IIa (4, 5, 7, 9) y IIb (6, 10) se desplazan entre el núcleo y el citoplasma. La clase III (sirtuinas) depende de NAD⁺ y se localiza en el núcleo, el citoplasma y las mitocondrias. La clase IV (HDAC11) es nuclear. La distribución espacial subyace a la especificidad funcional.

La actividad de HDAC3 está regulada por los ritmos diarios, vinculando el control metabólico con los ciclos de alimentación y ayuno. La alteración de estos patrones rítmicos, común en los estilos de vida modernos, puede contribuir a la disfunción metabólica y al desarrollo de diabetes (Harada et al., 2017).

Las investigaciones han demostrado que la expresión y la actividad de HDAC3 aumentan en tejidos de pacientes diabéticos y modelos animales. Este aumento de actividad contribuye al silenciamiento de genes metabólicos beneficiosos, a la vez que promueve la expresión de genes que agravan la resistencia a la insulina y la disfunción de las células β (W.-B. Chen et al., 2016b).

4.5 Otros reguladores epigenéticos en la diabetes

Además de DNMT1 y HDAC3, numerosas enzimas epigenéticas contribuyen a la patogénesis de la diabetes mediante mecanismos reguladores específicos. La familia HDAC incluye las HDAC de clase I (HDAC1, 2, 3, 8), que actúan principalmente en el núcleo y controlan la expresión génica metabólica y la función de las células β ; las HDAC de clase II (HDAC4, 5, 6, 7, 9, 10), que se desplazan entre el núcleo y el citoplasma, regulando los procesos transcripcionales y metabólicos, con especial importancia en el metabolismo de la glucosa en el músculo esquelético; las HDAC de clase III o sirtuinas (SIRT1-7), que requieren NAD⁺ y actúan como sensores metabólicos que coordinan la expresión génica con el estado energético celular; y las HDAC de clase IV (HDAC11), que regulan la respuesta inmunitaria y la inflamación metabólica en los tejidos diabéticos (Yan Dai and Douglas V. Faller, 2008). Otros reguladores clave incluyen DNMT3A y DNMT3B, que establecen patrones de metilación anormales en regiones de control de genes metabólicos durante la progresión de la diabetes, y las histonas acetiltransferasas (HAT) como p300, CBP y PCAF, cuya actividad reducida contribuye al silenciamiento de genes metabólicos beneficiosos (Hatting et al., 2018). Los ARN no codificantes representan otra capa reguladora crucial, con microARN como miR-375 que controla la detección de glucosa en las células β y la secreción de insulina, miR-146a que contribuye a la inflamación diabética y ARN largos no codificantes como ANRIL que regulan genes implicados en complicaciones vasculares. En conjunto, crean redes reguladoras complejas que controlan la expresión génica metabólica y

ofrecen nuevas posibilidades para intervenciones terapéuticas basadas en ARN.(Kaikkonen et al., 2011). La **Tabla 2** resume los reguladores y funciones.

Tabla 2: Clasificación completa de los reguladores epigenéticos y su función metabólica.

Clase objetivo	Objetivos específicos	Función	Relevancia de la enfermedad
HDAC de clase I	HDAC1, HDAC2, HDAC3, HDAC8	Represión transcripcional	diabetes tipo 2, síndrome metabólico, obesidad
HDAC de clase II	HDAC4, HDAC5, HDAC6, HDAC7, HDAC9, HDAC10	Regulación específica de tejidos	Metabolismo muscular
HDAC de clase III	SIRT1-7	Desacetilación dependiente de NAD ⁺	Envejecimiento, metabolismo
HDAC de clase IV	HDAC11	Regulación inmunitaria	Inflamación
DNMT	DNMT1, DNMT3A, DNMT3B	metilación del ADN	Memoria metabólica
TET	TET1, TET2, TET3	Desmetilación activa	desarrollo de las células β
Sombreros	p300, CBP, PCAF, GCN5	Activación transcripcional	Genes metabólicos
HMT	EZH2, SUV39H1, SETD7	Metilación de histonas	Estructura de la cromatina
HDM	LSD1, JMJD2A, JMJD3	Desmetilación de histonas	Activación genética
Proteínas BET	BRD2, BRD3, BRD4, BRDT	Lectura de la cromatina	Genes inflamatorios

Procesamiento de carbohidratos y objetivos enzimáticos

Cómo procesa el cuerpo los carbohidratos

El sistema digestivo humano utiliza diversas enzimas para descomponer los carbohidratos de la dieta en azúcares simples que pueden ser absorbidos por el torrente sanguíneo. Comprender estas enzimas es crucial para desarrollar estrategias para controlar los niveles de glucosa posprandial en la diabetes (Gregg et al., 2015).

La **Figura 4** ofrece una ilustración completa de la vía de digestión de carbohidratos, desde el consumo inicial de almidón hasta la absorción final de glucosa. El proceso de digestión comienza en la boca, donde la α -amilasa salival comienza a descomponer las moléculas de almidón. Este proceso continúa en el intestino delgado con la α -amilasa pancreática, que descompone aún más el almidón en oligosacáridos más pequeños. Finalmente, las enzimas α -glucosidasas, ubicadas en el borde en cepillo intestinal, completan la digestión

convirtiendo los oligosacáridos en moléculas individuales de glucosa que pueden ser absorbidas por el torrente sanguíneo.

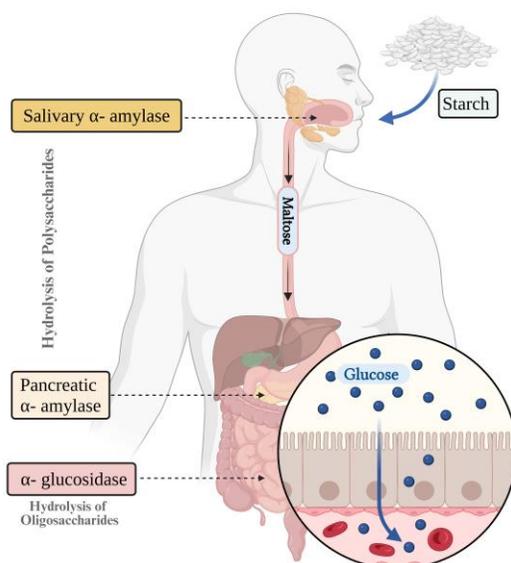


Figura 4. Resumen de la digestión y absorción de carbohidratos en la dieta. La α -amilasa salivar y pancreática descompone el almidón, mientras que la α -glucosidasa del borde en cepillo intestinal convierte los oligosacáridos en glucosa. El control de estas enzimas ayuda a controlar los niveles de glucosa posprandial en la diabetes (Gregg et al., 2015).

93

La α -amilasa, producida por el páncreas y las glándulas salivales, inicia la digestión de los carbohidratos rompiendo los enlaces internos del almidón, lo que produce fragmentos más pequeños y un azúcar llamado maltosa. Esta enzima muestra una actividad óptima a temperatura y pH corporales, lo que la hace esencial para el primer paso de la digestión de los carbohidratos (Janeček et al., 2014). Luego, las enzimas α -glucosidasas, ubicadas en la superficie de las células del intestino delgado, completan la digestión de los carbohidratos al hidrolizar las unidades terminales de glucosa de los pequeños fragmentos de carbohidratos y los azúcares dobles. Estas enzimas incluyen la maltasa, la sacarasa y la lactasa, cada una con especificidad para diferentes tipos de carbohidratos (Bhatnagar & Mishra, 2022).

La actividad de estas enzimas influye directamente en la tasa de absorción de glucosa y en los niveles de glucosa en sangre posteriores a las comidas. En la diabetes, la inhibición de

estas enzimas puede ayudar a reducir los aumentos de glucosa posprandiales, mejorando así el control general de la glucemia y reduciendo el riesgo de complicaciones (Wu et al., 2025).

Las investigaciones han demostrado que el momento y la duración de la digestión de los carbohidratos afectan significativamente la respuesta glucémica. Una digestión rápida provoca aumentos bruscos de glucosa que pueden sobrepasar la capacidad del organismo para responder adecuadamente, especialmente en personas con diabetes (Gregg et al., 2015).

5.2 Focalización de las enzimas digestivas para el manejo de la diabetes

Los científicos han descubierto que la inhibición de las enzimas digestivas representa uno de los enfoques más directos para controlar los niveles de glucosa posprandial en la diabetes. Muchas plantas producen compuestos que inhiben de forma natural las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa, probablemente como mecanismos de defensa, actuando mediante diversos mecanismos, como la inhibición competitiva (compitiendo con sustratos de carbohidratos por los sitios activos de las enzimas), la inhibición no competitiva (uniéndose a diferentes sitios y modificando la forma de las enzimas) o mecanismos combinados (Y.-M. Kim et al., 2004).

Al actuar sobre la α -amilasa salival y pancreática, así como sobre la α -glucosidasa intestinal, la inhibición enzimática en diferentes etapas de la digestión de carbohidratos puede controlar eficazmente la absorción de glucosa y reducir significativamente los picos de glucosa posprandiales tanto en personas sanas como en pacientes diabéticos, abordando así uno de los principales desafíos en el manejo de la diabetes (Sahnoun et al., 2017). El fármaco acarbosa ejemplifica este enfoque terapéutico, demostrando que la inhibición dual de la α -amilasa y la α -glucosidasa puede reducir los niveles de glucosa posprandial y mejorar el control general de la glucosa. Sin embargo, inhibidores sintéticos como la acarbosa causan efectos secundarios gastrointestinales debido a que los carbohidratos no digeridos llegan al intestino grueso, donde se produce la fermentación bacteriana (Paul & Raza, 2024).

La búsqueda de inhibidores enzimáticos naturales ha revelado numerosos compuestos vegetales con una importante actividad inhibidora que a menudo proporcionan efectos beneficiosos adicionales más allá de la inhibición enzimática, incluidas actividades antioxidantes y antiinflamatorias, que potencialmente ofrecen beneficios integrales para el

control de la diabetes con menos efectos secundarios que las alternativas sintéticas (Atanasov et al., 2021).

Enfoques terapéuticos: de las limitaciones sintéticas a las alternativas naturales

6.1 Terapéuticas sintéticas actuales y sus limitaciones

La farmacoterapia contemporánea para la diabetes se basa predominantemente en compuestos sintéticos que actúan sobre vías metabólicas aisladas. Si bien la metformina, las sulfonilureas y agentes más nuevos, como los inhibidores de la DPP-4, demuestran eficacia glucémica, no abordan la desregulación epigenética fundamental que subyace a la patogénesis de la diabetes. Los inhibidores sintéticos de HDAC, como el vorinostat y la romidepsina, presentan graves toxicidades limitantes de la dosis, como mielosupresión, arritmias cardíacas y hepatotoxicidad (Sager et al., 2015). Los inhibidores de la ADN metiltransferasa, como la 5-azacitidina, causan una profunda supresión de la médula ósea, lo que limita su aplicabilidad terapéutica. El inhibidor enzimático acarbosa, si bien es eficaz para el control de la glucosa posprandial, causa eventos adversos gastrointestinales significativos en el 70 % de los pacientes, lo que lleva a la interrupción del tratamiento (Yoon & Eom, 2016).

6.2 Productos naturales como agentes terapéuticos integrativos

Los compuestos bioactivos naturales ofrecen ventajas únicas al actuar simultáneamente sobre la maquinaria epigenética y las enzimas metabólicas, lo que proporciona enfoques terapéuticos integrales con perfiles de tolerabilidad mejorados (Karaman Mayack et al., 2020). Estos fitoquímicos demuestran mecanismos pleiotrópicos que abordan la fisiopatología multifactorial de la diabetes, a la vez que modulan tanto la disfunción metabólica inmediata como la desregulación epigenética a largo plazo. Avances recientes en la comprensión de la modulación epigenética mediada por flavonoides han revelado nuevos mecanismos para la prevención y el tratamiento de la diabetes mediante la metilación del ADN, la modificación de histonas y las vías de expresión del ARN no codificante (S. Han et al., 2023). Compuestos naturales con regulación epigenética están resumidas en la **Tabla 3** y en **Tabla 4** se resume la actividad de compuestos naturales sobre enzimas metabólicas.

Tabla 3: Evidencia clínica de productos naturales en la epigenética y regulación metabólica de la diabetes.

Fitoquímico /Referencia	Categoría fitoquímica	Perfil mecanístico dual	Parámetros de investigación clínica	Resultados terapéuticos
Quercetina (D. Li et al., 2020; D. Wang et al., 2021)	flavonol	Eje epigenético: reversión de la hipermetilación del promotor PGC-1 α (sitio de -260 nt), remodelación de la cromatina c/EBP α , inhibición dual de HAT/HDAC, modulación de la vía miR-1306-5p/HSD17B7. Objetivo metabólico: inhibición competitiva de la α -glucosidasa, eliminación del superóxido mitocondrial, reducción del estrés del retículo endoplásmico.	Diseño: Intervención aleatoria controlada con placebo + modelo diabético inducido por STZ< br >Población: 156 pacientes con síndrome metabólico + ratas Sprague Dawley< br >Duración: 12 semanas en humanos / 4 semanas en animales< br >Dosis: Matriz de pan enriquecida al 0,05 % / 20-50 mg/kg de peso corporal	Primario: \downarrow Colesterol total (p<0,05), \downarrow LDL-C, \downarrow triglicéridos< br >Secundario: \downarrow Glucemia en ayunas, \downarrow genotoxicidad celular, \downarrow ferroptosis pancreática< br >Mecanismo: β -oxidación mitocondrial mejorada, sensibilidad a la insulina restaurada
Kaempferol (Suchal et al., 2017)	Flavonol	κ B p65 mediada por SIRT1, modificaciones de la cromatina H3K9, supresión de la metilación de PPAR γ H3K4. Integración metabólica: reducción del estrés oxidativo de las células β pancreáticas, antagonismo de la adipogénesis.	Modelo: Miocardiopatía diabética inducida por STZ< br >Evaluación: Análisis histológico y molecular< br >Intervención: 20 mg/kg de peso corporal< br >Cronología: Protocolo de tratamiento de 8 semanas	Cardioprotector: \downarrow Hipertrofia ventricular, \downarrow marcadores inflamatorios< br >Metabólico: \uparrow Sensibilidad a la insulina, \downarrow parámetros de estrés oxidativo< br >Epigenético: Arquitectura de la cromatina restaurada
Luteolina-7-O-glucósido (L. Li et al., 2019)	Flavona glicosilada	Regulación de la cromatina: desmetilación del promotor Nrf2, inhibición de la acetiltransferasa CBP/p300 (3-10 μ M), supresión transcripcional de NF- κ B. Modulación enzimática: inhibición no competitiva de la α -amilasa, regulación positiva de la enzima antioxidante.	Plataforma: Cardiomiocitos H9C2 inducidos por glucosa alta + monocitos THP-1 humanos< br >Validación: Corazones de ratón diabético STZ< br >Concentración: 50-100 μ M in vitro / 3-10 μ M para efectos epigenéticos< br >Traducción: 100 mg diarios equivalente humano	Citoprotector: \downarrow apoptosis de cardiomiocitos, \downarrow citocinas proinflamatorias< br >Epigenético: Expresión génica mediada por Nrf2 restaurada, actividad HAT reducida< br >Metabólico: Mayor eficiencia en la utilización de la glucosa
Apigenina (F. Wang et al., 2021)	Trihidroxiflavona	Red de miRNA: regulación positiva de miR-122-5p, regulación negativa de HIF-1 α , interrupción de la vía TGF- β 1/Smad2/3. Señalización metabólica: inhibición de CD38, restauración del nivel de NAD ⁺ , activación de la vía AMPK.	Tipo de estudio: Intervención controlada aleatoria< br >Sujetos: Ratones obesos con deficiencia de CD38< br >Traducción humana: Pacientes con síndrome metabólico< br >Rango de dosis: Equivalente diario de 25 a 50 mg	Corrección metabólica: \uparrow Tolerancia a la glucosa, \downarrow acetilación total de proteínas< br >Antifibrótico: \downarrow Diferenciación de fibroblastos cardíacos< br >Inflamatorio: \downarrow IL-6, \downarrow Expresión de TNF- α
EGCG (X. H. Yang et al., 2020; Zhong et al., 2016)	Derivado de galocatequina	Modificación del ADN: inhibición de DNMT3a, desmetilación del gen Klotho, mejora de la accesibilidad global de la cromatina, reversión de la hipermetilación del gen de cierre del tubo neural. Inhibición del transporte: bloqueo de la actividad de SGLT1, reducción de la captación de glucosa.	Marco clínico: Ratones diabéticos db / db + validación de células HK-2 + ratones preñados diabéticos/no diabéticos< br >Estudio en humanos: Pacientes con diabetes tipo 2 (n = 45)< br >Dosis: 300 mg diarios de extracto de té verde / 1-10 μ M in vitro< br >Duración: Intervención monitorizada de 12 semanas	Renoprotector : \downarrow Marcadores de nefropatía diabética< br >Metabólico: \downarrow Glucemia, \downarrow Estrés oxidativo< br >Protección teratogénica: Prevención de defectos del tubo neural< br >Epigenético: Expresión génica antienvjecimiento restaurada
Naringenina (S. Wang et al., 2021)	Flavanona cítrica	Epigenética cardíaca: modulación del eje miR-126-PI3K/AKT, regulación de la acetilación de p300 mediada por AMPK (50 mg/kg)< br >Protección pancreática: supresión de la expresión de TXNIP, mejora de la sensibilidad a la glucosa de las células β	Diseño experimental: modelo de rata diabética STZ + ratones diabéticos db / db < br >Correlación clínica: pacientes hipertriglicéridémicos < br >Dosis: 25 mg/kg (animal), 50 mg diarios (humano)< br >Evaluación: período de intervención de 4 semanas	Cardioprotector: \downarrow Lesión por isquemia-reperfusión miocárdica< br >Metabólico: \uparrow Sensibilidad a la glucosa de las células β , \downarrow Apoptosis< br >Epigenético: Modulación de la acetilación de histonas a través de la vía AMPK/p300< br >Vascular: Mejora de la función endotelial
Hesperidina (Homayouni et al., 2018)	Glicósido cítrico	Vía SIRT1: activación de SIRT1 mediada por AMPK/CREB, desacetilación de RelA /p65, supresión inflamatoria de NF- κ B. Sistema	Diseño del estudio: ECA doble ciego controlado con placebo< br >Población: Pacientes con diabetes tipo 2 (n = 64)< br >Intervención:	Antihipertensivo: \downarrow PA sistólica, \downarrow presión arterial media< br >Antiinflamatorio: \downarrow IL-6, \downarrow niveles de hs -CRP< br >

		antioxidante: prevención de daños en el ADN, inhibición de la peroxidación lipídica .	500 mg diarios de hesperidina< br >Seguimiento: 6 semanas con evaluación de biomarcadores	>Oxidativo: ↑Capacidad antioxidante total
Puerarin (P. Han et al., 2015; Kwok et al., 2022)	glucósido de isoflavona	Remodelación cardíaca: aumento de la expresión de miR-15b/miR-195, inhibición de la vía no canónica de TGF-β, supresión de la metilación de H3K4me2/3 (25 mM). Protección vascular : supresión de la expresión de MCP-1, modulación de la actividad de HDAC1/HDAC3.	Diseño del ensayo: ensayo cruzado, aleatorizado, doble ciego + validación del modelo STZ< br >Participantes: 217 hombres chinos (18-50 años) + estudio del tejido de la cabeza femoral< br >Intervención: suplemento diario de puerarin de 90,2 mg< br >Criterio de valoración principal: marcadores de riesgo cardiovascular + análisis epigenético	Glucémico: ↓Niveles de glucosa en sangre en ayunas< br >Cardiovascular: ↓Estimación del riesgo de ECV a 10 años< br >Epigenético: Expresión genética endotelial mejorada, metilación de histonas reducida en promotores inflamatorios< br >Antiinflamatorio: ↓Apoptosis inducida por fructosa
Genisteína (Braxas et al., 2019; Gan et al., 2020)	Isoflavona de soja	Regulación multiobjetivo: acetilación de histonas del promotor Klotho, inhibición de la gluconeogénesis mediada por miR-451, modulación de la vía miR-222 (200 mg/kg). Reprogramación metabólica : focalización de BTG2/adipor1, mejora de la secreción de insulina estimulada por glucosa.	Ensayo clínico: Modelo de ratón obeso, aleatorizado y controlado con placebo. Sujetos : Mujeres con diabetes tipo 2 posmenopáusicas (n = 54) y ratones C57BL/6. Protocolo: 54 mg dos veces al día durante 12 semanas en humanos/200 mg/kg en ratones . Evaluaciones: Parámetros metabólicos y oxidativos, y perfil de miRNA.	Control glucémico: ↓Glucemia en ayunas, ↓HbA1c< br >Perfil lipídico: ↓Triglicéridos séricos< br >Antioxidante: ↑TAC, ↓malondialdehído< br >Epigenético: Prevención de la obesidad mediante la regulación negativa de miR-222
Antocianinas mixtas (L. Yang et al., 2021)	Complejo de antocianidina	Epigenética inflamatoria: supresión de IL-17 mediada por miR-214, regulación negativa de lncRNA-AK081284. Mejora metabólica : optimización del metabolismo de la glucosa, mejora de la sensibilidad a la insulina.	Marco del estudio: RCT con prediabéticos/DM2 recién diagnosticados< br >Tamaño de la muestra: 160 participantes (40-75 años)< br >Tratamiento: 320 mg diarios de antocianinas< br >Duración: 12 semanas de evaluación integral	Glucémico: ↓HbA1c, ↓niveles de apolipoproteína< br >Antiinflamatorio: ↓IL-6, ↓IL-18, ↓TNF-α< br >Metabólico: Perfil de adipocinas séricas mejorado
Isorhamnetina (Matboli et al., 2021)	Alcaloide bioactivo	Regulación de la autofagia: modulación del gen de autofagia mediada por miRNA, regulación negativa de lncRNA-RP11-773H22.4. Señalización de la insulina: regulación positiva del ARNm de AKT2, mejora de miR-1/miR-3163.	Modelo experimental: Ratas con diabetes mellitus tipo 2< br >Traducción clínica: Pacientes con resistencia a la insulina< br >Dosis: 50 mg/kg/día (equivalente animal)< br >Evaluación: Intervención integral de 8 semanas	Nefroprotector: Expresión mejorada del gen de autofagia< br >Metabólico: Sensibilidad mejorada a la insulina en el músculo esquelético y el tejido adiposo< br >Epigenético: Expresión restaurada del gen de la vía de señalización de la insulina
Baicalina (Jiang et al., 2022; X.-T. Zhang et al., 2020)	Glicósido de flavona	Control de la metilación del ADN: modificación epigenética de HKDC1 (ADN 5mC y ARN m6A), desmetilación del promotor Klotho. Supresión tumoral: inhibición de la hepatocarcinogénesis inducida por diabetes tipo 2 .	Sistema de modelo dual: modelo de tumor hepático inducido por diabetes tipo 2 + ratones diabéticos inducidos por STZ< br >Intervención: 50 mg/L (modelo de tumor) / 40 mg/kg/día (modelo de diabetes)< br >Evaluación: Análisis molecular e histológico	Antitumorgénico: suprime la progresión del tumor hepático de diabetes tipo 2< br >Renoprotector: mejora la lesión renal diabética< br >Epigenético: revierte los patrones patológicos de metilación del ADN< br >Metabólico: mejora la tolerancia a la glucosa
Matriz de isoflavonas de cacao (Curtis et al., 2012)	Sinergia polifenólica	Modulación integral: regulación global de la metilación del ADN, focalización multi-HDAC, mejora de la accesibilidad de la cromatina. Integración metabólica: coordinación de múltiples vías enzimáticas, biogénesis mitocondrial.	Estándar de oro: ECA doble ciego< br >Población: Mujeres posmenopáusicas con diabetes tipo 2 (n = 93)< br >Intervención: 27 g de chocolate al día (850 mg de flavan-3-oles + 100 mg de isoflavonas)< br >Cronología: Estudio longitudinal de 12 meses	Sensibilidad a la insulina: ↓Índice HOMA-IR< br >Cardiovascular: ↑Relación HDL/LDL, ↓Riesgo de enfermedad coronaria a 10 años< br >A largo plazo: Mejoras metabólicas sostenidas

Tabla 4: Productos naturales con evidencia de ensayos clínicos dirigidos a la α -amilasa y la α -glucosidasa.

Producto natural	Diseño de ensayos clínicos	Inhibición enzimática (IC50)	Resultados clínicos primarios	Estado/fase del ensayo	Referencia
Quercetina	ECA, n=156 pacientes con síndrome metabólico, 12 semanas, matriz de pan enriquecida al 0,05 %	α -glucosidasa: 58-60 $\mu\text{g}/\text{mL}$; Inhibición competitiva	\downarrow Colesterol total ($p<0,05$), \downarrow C-LDL, \downarrow triglicéridos, \downarrow glucemia en ayunas	Fase II completada	(Chuang et al., 2010; HADINATA et al., 2025)
EGCG	Pacientes con diabetes tipo 2 (n = 25), cápsulas de 150-300 mg/día, 8-12 semanas	α -glucosidasa: 110-120 $\mu\text{g}/\text{mL}$; Bloqueo de SGLT1 (IC50=57,99 μM)	\downarrow Glucemia en ayunas, \downarrow marcadores de estrés oxidativo, mejora de la función renal	Fase II completada	(Hintzpeter et al., 2014; Mousavi et al., 2013)
Cúrcuma	Múltiples ECA, formulaciones de nanomicelas, n = 240 pacientes con diabetes tipo 2, 30-1500 mg/día, 3-9 meses	Inhibición de 11 β -HSD1 (IC50=2,3-5,8 μM); modulación de PTP1B	Prevención: 16% \downarrow desarrollo de DM2 vs placebo; Tratamiento: \downarrow glucemia en ayunas (18%), \downarrow HbA1c (11%)	Fase III completada	(Chuengsamarn et al., 2012; Pivari et al., 2019)
Fenogreco	Metaanálisis de 10 ECA, n=1200+ pacientes, 1-100 g/día, 10-84 días	α -glucosidasa: 49,40 $\mu\text{g}/\text{mL}$; inhibición de GFAT	\downarrow FBG (-17,93 mg/dl), \downarrow glucosa a las 2 h (-39,46 mg/dl), \downarrow HbA1c (-0,85%)	Fase II completada varias veces	(Gong et al., 2016; Neelakantan et al., 2014)

CONCLUSIÓN

Este capítulo ha ilustrado la compleja interacción entre las modificaciones epigenéticas y la disfunción metabólica en la diabetes mellitus, revelando cómo los factores ambientales y el estrés metabólico crean cambios moleculares persistentes que impulsan la progresión de la enfermedad y sus complicaciones. El descubrimiento de que las alteraciones epigenéticas subrayan el fenómeno de la memoria metabólica proporciona información crucial sobre por qué las complicaciones diabéticas persisten incluso después de lograr un buen control glucémico, lo que enfatiza la importancia de una intervención intensiva temprana. Las terapias con uso de drogas sintéticas demuestran un éxito limitado debido a su focalización y sus significativos efectos secundarios, los compuestos bioactivos naturales ofrecen un potencial terapéutico revolucionario gracias a su capacidad para modular simultáneamente la maquinaria epigenética y las vías metabólicas clave en la producción de glucosa. La evidencia clínica presentada demuestra que, compuestos como la quercetina, epigallocatequina (EGCG), la curcumina y los extractos de jengibre proporcionan beneficios integrales al abordar tanto la disfunción metabólica inmediata como la desregulación epigenética subyacente. A medida que nuestra comprensión de la epigenética de la diabetes continúa evolucionando, estos enfoques terapéuticos naturales representan un prometedor cambio de paradigma hacia una medicina personalizada e integrativa que se centra en los mecanismos moleculares fundamentales que impulsan este complejo trastorno metabólico, ofreciendo la esperanza de mejores resultados y una reducción de las complicaciones para los millones de personas afectadas por la diabetes en todo el mundo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Atanasov, A. G., Zotchev, S. B., Dirsch, V. M., Orhan, I. E., Banach, M., Rollinger, J. M., Barreca, D., Weckwerth, W., Bauer, R., Bayer, E. A., Majeed, M., Bishayee, A., Bochkov, V., Bonn, G. K., Braidy, N., Bucar, F., Cifuentes, A., D'Onofrio, G., Bodkin, M., ... Supuran, C. T. (2021). Natural products in drug discovery: advances and opportunities. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20(3), 200–216. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-00114-z>
- Banday, M. Z., Sameer, A. S., & Nissar, S. (2020). Pathophysiology of diabetes: An overview. *Avicenna Journal of Medicine*, 10(04), 174–188. https://doi.org/10.4103/ajm.ajm_53_20
- Bashtrykov, P., Jankevicius, G., Jurkowska, R. Z., Ragozin, S., & Jeltsch, A. (2014). The UHRF1 Protein Stimulates the Activity and Specificity of the Maintenance DNA Methyltransferase DNMT1 by an Allosteric Mechanism. *Journal of Biological Chemistry*, 289(7), 4106–4115. <https://doi.org/10.1074/jbc.M113.528893>
- Bhatnagar, A., & Mishra, A. (2022). α -Glucosidase Inhibitors for Diabetes/Blood Sugar Regulation. In *Natural Products as Enzyme Inhibitors* (pp. 269–283). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0932-0_12
- Braxas, H., Rafraf, M., Karimi Hasanabad, S., & Asghari Jafarabadi, M. (2019). Effectiveness of Genistein Supplementation on Metabolic Factors and Antioxidant Status in Postmenopausal Women With Type 2 Diabetes Mellitus. *Canadian Journal of Diabetes*, 43(7), 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.jcjd.2019.04.007>
- Burrow, K., Fletcher, S., Lee, H., & Serventi, L. (2023). *Bioactive Compounds from Food and Their Applications in the Treatment of Type 2 Diabetes* (pp. 119–133). https://doi.org/10.1007/978-3-031-12358-0_9
- Camacho, P., Ribeiro, E., Pereira, B., Nascimento, J., Caldeira Rosa, P., Henriques, J., Barrão, S., Sadio, S., Quendera, B., Delgadinho, M., Ginete, C., Silva, C., & Brito, M. (2025). DNA Methyltransferase Expression (DNMT1, DNMT3a, and DNMT3b) as a Potential Biomarker in Age-Related Macular Degeneration. *Journal of Clinical Medicine*, 14(2), 559. <https://doi.org/10.3390/jcm14020559>
- Caturano, A., D'Angelo, M., Mormone, A., Russo, V., Mollica, M. P., Salvatore, T., Galiero, R., Rinaldi, L., Vetrano, E., Marfella, R., Monda, M., Giordano, A., & Sasso, F. C. (2023). Oxidative Stress in Type 2 Diabetes: Impacts from Pathogenesis to Lifestyle Modifications. *Current Issues in Molecular Biology*, 45(8), 6651–6666. <https://doi.org/10.3390/cimb45080420>

- Chen, T., Mahdadi, S., Vidal, M., & Desbène-Finck, S. (2024). Non-nucleoside inhibitors of DNMT1 and DNMT3 for targeted cancer therapy. *Pharmacological Research*, 207, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2024.107328>
- Chen, W.-B., Gao, L., Wang, J., Wang, Y.-G., Dong, Z., Zhao, J., Mi, Q.-S., & Zhou, L. (2016a). Conditional ablation of HDAC3 in islet beta cells results in glucose intolerance and enhanced susceptibility to STZ-induced diabetes. *Oncotarget*, 7(36), 57485–57497. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.11295>
- Chen, W.-B., Gao, L., Wang, J., Wang, Y.-G., Dong, Z., Zhao, J., Mi, Q.-S., & Zhou, L. (2016b). Conditional ablation of HDAC3 in islet beta cells results in glucose intolerance and enhanced susceptibility to STZ-induced diabetes. *Oncotarget*, 7(36), 57485–57497. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.11295>
- Chuang, C.-C., Martinez, K., Xie, G., Kennedy, A., Bumrungpert, A., Overman, A., Jia, W., & McIntosh, M. K. (2010). Quercetin is equally or more effective than resveratrol in attenuating tumor necrosis factor- α -mediated inflammation and insulin resistance in primary human adipocytes. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 92(6), 1511–1521. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2010.29807>
- Chuengsamarn, S., Rattanamongkolgul, S., Luechapudiporn, R., Phisalaphong, C., & Jirawatnotai, S. (2012). Curcumin Extract for Prevention of Type 2 Diabetes. *Diabetes Care*, 35(11), 2121–2127. <https://doi.org/10.2337/dc12-0116>
- Copenhaver, M., & Hoffman, R. P. (2017). Type 1 diabetes: where are we in 2017? *Translational Pediatrics*, 6(4), 359–364. <https://doi.org/10.21037/tp.2017.09.09>
- Curtis, P. J., Sampson, M., Potter, J., Dhatariya, K., Kroon, P. A., & Cassidy, A. (2012). Chronic Ingestion of Flavan-3-ols and Isoflavones Improves Insulin Sensitivity and Lipoprotein Status and Attenuates Estimated 10-Year CVD Risk in Medicated Postmenopausal Women With Type 2 Diabetes. *Diabetes Care*, 35(2), 226–232. <https://doi.org/10.2337/dc11-1443>
- Dong, H., Sun, Y., Nie, L., Cui, A., Zhao, P., Leung, W. K., & Wang, Q. (2024). Metabolic memory: mechanisms and diseases. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), 38. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01755-x>
- El Ouaamari, A., Baroukh, N., Martens, G. A., Lebrun, P., Pipeleers, D., & van Obberghen, E. (2008). miR-375 Targets 3'-Phosphoinositide-Dependent Protein Kinase-1 and Regulates Glucose-Induced Biological Responses in Pancreatic β -Cells. *Diabetes*, 57(10), 2708–2717. <https://doi.org/10.2337/db07-1614>
- Fasolino, M., Goldman, N., Wang, W., Cattau, B., Zhou, Y., Petrovic, J., Link, V. M., Cote, A., Chandra, A., Silverman, M., Joyce, E. F., Little, S. C., Kaestner, K. H., Najj, A., Raj, A., Henao-Mejia, J., Faryabi, R. B., & Vahedi, G. (2020). Genetic Variation in

Type 1 Diabetes Reconfigures the 3D Chromatin Organization of T Cells and Alters Gene Expression. *Immunity*, 52(2), 257-274.e11.
<https://doi.org/10.1016/j.immuni.2020.01.003>

Galicia-Garcia, U., Benito-Vicente, A., Jebari, S., Larrea-Sebal, A., Siddiqi, H., Uribe, K. B., Ostolaza, H., & Martín, C. (2020a). Pathophysiology of Type 2 Diabetes Mellitus. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), 6275.
<https://doi.org/10.3390/ijms21176275>

Galicia-Garcia, U., Benito-Vicente, A., Jebari, S., Larrea-Sebal, A., Siddiqi, H., Uribe, K. B., Ostolaza, H., & Martín, C. (2020b). Pathophysiology of Type 2 Diabetes Mellitus. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), 6275.
<https://doi.org/10.3390/ijms21176275>

Gan, M., Shen, L., Wang, S., Guo, Z., Zheng, T., Tan, Y., Fan, Y., Liu, L., Chen, L., Jiang, A., Li, X., Zhang, S., & Zhu, L. (2020). Genistein inhibits high fat diet-induced obesity through miR-222 by targeting BTG2 and adipor1. *Food & Function*, 11(3), 2418–2426. <https://doi.org/10.1039/C9FO00861F>

Garza, M., & Abascal Miguel, L. (2025). Health disparities among indigenous populations in Latin America: a scoping review. *International Journal for Equity in Health*, 24(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s12939-025-02495-2>

Gong, J., Fang, K., Dong, H., Wang, D., Hu, M., & Lu, F. (2016). Effect of fenugreek on hyperglycaemia and hyperlipidemia in diabetes and prediabetes: A meta-analysis. *Journal of Ethnopharmacology*, 194, 260–268.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.08.003>

Gregg, K. J., Suits, M. D. L., Deng, L., Vocadlo, D. J., & Boraston, A. B. (2015). Structural Analysis of a Family 101 Glycoside Hydrolase in Complex with Carbohydrates Reveals Insights into Its Mechanism. *Journal of Biological Chemistry*, 290(42), 25657–25669. <https://doi.org/10.1074/jbc.M115.680470>

HADINATA, E., TASLIM, N. A., & NURKOLIS, F. (2025). Fruit- and Vegetable-Derived Polyphenols Improve Metabolic and Renal Outcomes in Adults with Metabolic Syndrome and Chronic Kidney Disease: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria*, 45(2).
<https://doi.org/10.12873/452hadinata>

Han, P., Gao, D., Zhang, W., Liu, S., Yang, S., & Li, X. (2015). Puerarin suppresses high glucose-induced MCP-1 expression via modulating histone methylation in cultured endothelial cells. *Life Sciences*, 130, 103–107.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2015.02.022>

- Han, S., Luo, Y., Liu, B., Guo, T., Qin, D., & Luo, F. (2023). Dietary flavonoids prevent diabetes through epigenetic regulation: advance and challenge. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *63*(33), 11925–11941. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2097637>
- Hao, J., & Liu, Y. (2023). Epigenetics of methylation modifications in diabetic cardiomyopathy. *Frontiers in Endocrinology*, *14*. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1119765>
- Harada, T., Ohguchi, H., Grondin, Y., Kikuchi, S., Sagawa, M., Tai, Y.-T., Mazitschek, R., Hideshima, T., & Anderson, K. C. (2017). HDAC3 regulates DNMT1 expression in multiple myeloma: therapeutic implications. *Leukemia*, *31*(12), 2670–2677. <https://doi.org/10.1038/leu.2017.144>
- Hatting, M., Tavares, C. D. J., Sharabi, K., Rines, A. K., & Puigserver, P. (2018). Insulin regulation of gluconeogenesis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1411*(1), 21–35. <https://doi.org/10.1111/nyas.13435>
- Hintzpeter, J., Stapelfeld, C., Loerz, C., Martin, H.-J., & Maser, E. (2014). Green Tea and One of Its Constituents, Epigallocatechine-3-gallate, Are Potent Inhibitors of Human 11 β -hydroxysteroid Dehydrogenase Type 1. *PLoS ONE*, *9*(1), e84468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084468>
- Hoehn, K. L., Hohnen-Behrens, C., Cederberg, A., Wu, L. E., Turner, N., Yuasa, T., Ebina, Y., & James, D. E. (2008). IRS1-Independent Defects Define Major Nodes of Insulin Resistance. *Cell Metabolism*, *7*(5), 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2008.04.005>
- Homayouni, F., Haidari, F., Hedayati, M., Zakerkish, M., & Ahmadi, K. (2018). Blood pressure lowering and anti-inflammatory effects of hesperidin in type 2 diabetes; a randomized double-blind controlled clinical trial. *Phytotherapy Research*, *32*(6), 1073–1079. <https://doi.org/10.1002/ptr.6046>
- Hossain, Md. J., Al-Mamun, Md., & Islam, Md. R. (2024). Diabetes mellitus, the fastest growing global public health concern: Early detection should be focused. *Health Science Reports*, *7*(3). <https://doi.org/10.1002/hsr2.2004>
- Huang, W., Zhu, Q., Shi, Z., Tu, Y., Li, Q., Zheng, W., Yuan, Z., Li, L., Zu, X., Hao, Y., Chu, B., & Jiang, Y. (2024). Dual inhibitors of DNMT and HDAC induce viral mimicry to induce antitumour immunity in breast cancer. *Cell Death Discovery*, *10*(1), 143. <https://doi.org/10.1038/s41420-024-01895-7>
- Hudish, L. I., Reusch, J. E. B., & Sussel, L. (2019). β Cell dysfunction during progression of metabolic syndrome to type 2 diabetes. *Journal of Clinical Investigation*, *129*(10), 4001–4008. <https://doi.org/10.1172/JCI129188>

- Im, S.-S., Kang, S.-Y., Kim, S.-Y., Kim, H., Kim, J.-W., Kim, K.-S., & Ahn, Y.-H. (2005). Glucose-Stimulated Upregulation of GLUT2 Gene Is Mediated by Sterol Response Element-Binding Protein-1c in the Hepatocytes. *Diabetes*, *54*(6), 1684–1691. <https://doi.org/10.2337/diabetes.54.6.1684>
- Janeček, Š., Svensson, B., & MacGregor, E. A. (2014). α -Amylase: an enzyme specificity found in various families of glycoside hydrolases. *Cellular and Molecular Life Sciences*, *71*(7), 1149–1170. <https://doi.org/10.1007/s00018-013-1388-z>
- Jiang, H., Yao, Q., An, Y., Fan, L., Wang, J., & Li, H. (2022). Baicalin suppresses the progression of Type 2 diabetes-induced liver tumor through regulating METTL3/m6A/HKDC1 axis and downstream p-JAK2/STAT1/cleaved Caspase3 pathway. *Phytomedicine*, *94*, 153823. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2021.153823>
- Kaikkonen, M. U., Lam, M. T. Y., & Glass, C. K. (2011). Non-coding RNAs as regulators of gene expression and epigenetics. *Cardiovascular Research*, *90*(3), 430–440. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvr097>
- KANETO, H., MIYATSUKA, T., KAWAMORI, D., YAMAMOTO, K., KATO, K., SHIRAIWA, T., KATAKAMI, N., YAMASAKI, Y., MATSUHISA, M., & MATSUOKA, T. (2008). PDX-1 and MafA Play a Crucial Role in Pancreatic β -Cell Differentiation and Maintenance of Mature β -Cell Function. *Endocrine Journal*, *55*(2), 235–252. <https://doi.org/10.1507/endocrj.K07E-041>
- Karaman Mayack, B., Sippl, W., & Ntie-Kang, F. (2020). Natural Products as Modulators of Sirtuins. *Molecules*, *25*(14), 3287. <https://doi.org/10.3390/molecules25143287>
- Kim, Y. K., Won, K. C., & Sussel, L. (2024). Glucose metabolism partially regulates β -cell function through epigenomic changes. *Journal of Diabetes Investigation*, *15*(6), 649–655. <https://doi.org/10.1111/jdi.14173>
- Kim, Y.-M., Wang, M.-H., & Rhee, H.-I. (2004). A novel α -glucosidase inhibitor from pine bark. *Carbohydrate Research*, *339*(3), 715–717. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.11.005>
- Kwok, M. K., Leung, G. M., Xu, L., Tse, H. F., Lam, T. H., & Schooling, C. M. (2022). Effect of puerarin supplementation on cardiovascular disease risk factors: A randomized, double-blind, placebo-controlled, 2-way crossover trial. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *153*, 113472. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113472>
- L, S.-L., A, C.-C., AG, A., MN, C., MA, E., LG, G.-O., M, G., A, P.-S., S San, M., A, C., JJ, G., & IBEROBDIA, P. G. (2019). Diabetes in Latin America: Prevalence, Complications, and Socio-Economic Impact. *International Journal of Diabetes and Clinical Research*, *6*(3). <https://doi.org/10.23937/2377-3634/1410112>

- Lam, T.-P., Tran, N.-V. N., Pham, L.-H. D., Lai, N. V.-T., Dang, B.-T. N., Truong, N.-L. N., Nguyen-Vo, S.-K., Hoang, T.-L., Mai, T. T., & Tran, T.-D. (2023). *Flavonoids as dual-target inhibitors against α -glucosidase and α -amylase: a systematic review of in vitro studies*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-cdlf8-v3>
- Laranjeira, A. B. A., Hollingshead, M. G., Nguyen, D., Kinders, R. J., Doroshov, J. H., & Yang, S. X. (2023). DNA damage, demethylation and anticancer activity of DNA methyltransferase (DNMT) inhibitors. *Scientific Reports*, *13*(1), 5964. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32509-4>
- Lautié, E., Russo, O., Ducrot, P., & Boutin, J. A. (2020). Unraveling Plant Natural Chemical Diversity for Drug Discovery Purposes. *Frontiers in Pharmacology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00397>
- Li, D., Jiang, C., Mei, G., Zhao, Y., Chen, L., Liu, J., Tang, Y., Gao, C., & Yao, P. (2020). Quercetin Alleviates Ferroptosis of Pancreatic β Cells in Type 2 Diabetes. *Nutrients*, *12*(10), 2954. <https://doi.org/10.3390/nu12102954>
- Li, L., Luo, W., Qian, Y., Zhu, W., Qian, J., Li, J., Jin, Y., Xu, X., & Liang, G. (2019). Luteolin protects against diabetic cardiomyopathy by inhibiting NF- κ B-mediated inflammation and activating the Nrf2-mediated antioxidant responses. *Phytomedicine*, *59*, 152774. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2018.11.034>
- Ling, C., & Rönn, T. (2019). Epigenetics in Human Obesity and Type 2 Diabetes. *Cell Metabolism*, *29*(5), 1028–1044. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2019.03.009>
- Liu, J., Lang, G., & Shi, J. (2021). Epigenetic Regulation of PDX-1 in Type 2 Diabetes Mellitus. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy, Volume 14*, 431–442. <https://doi.org/10.2147/DMSO.S291932>
- Matboli, M., Ibrahim, D., Hasanin, A. H., Hassan, M. K., Habib, E. K., Bekhet, M. M., Afifi, A. M., & Eissa, S. (2021). Epigenetic Modulation of Autophagy Genes Linked to Diabetic Nephropathy by Administration of Isorhamnetin in Type 2 Diabetes Mellitus Rats. *Epigenomics*, *13*(3), 187–202. <https://doi.org/10.2217/epi-2020-0353>
- Mousavi, A., Vafa, M., Neyestani, T., Khamseh, M., & Hoseini, F. (2013). The effects of green tea consumption on metabolic and anthropometric indices in patients with Type 2 diabetes. *Journal of Research in Medical Sciences : The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*, *18*(12), 1080–1086.
- Nakshine, V. S., & Jogdand, S. D. (2023). A Comprehensive Review of Gestational Diabetes Mellitus: Impacts on Maternal Health, Fetal Development, Childhood Outcomes, and Long-Term Treatment Strategies. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.47500>

- Nathan, D. M. (2014). The Diabetes Control and Complications Trial/Epidemiology of Diabetes Interventions and Complications Study at 30 Years: Overview. *Diabetes Care*, 37(1), 9–16. <https://doi.org/10.2337/dc13-2112>
- Neelakantan, N., Narayanan, M., de Souza, R. J., & van Dam, R. M. (2014). Effect of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*L.) intake on glycemia: a meta-analysis of clinical trials. *Nutrition Journal*, 13(1), 7. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-13-7>
- Paul, R. K., & Raza, K. (2024). Natural hypoglycaemic bioactives: Newer avenues and newer possibilities. *Phytotherapy Research*, 38(9), 4428–4452. <https://doi.org/10.1002/ptr.8281>
- Pivari, F., Mingione, A., Brasacchio, C., & Soldati, L. (2019). Curcumin and Type 2 Diabetes Mellitus: Prevention and Treatment. *Nutrients*, 11(8), 1837. <https://doi.org/10.3390/nu11081837>
- Sager, P. T., Balsler, B., Wolfson, J., Nichols, J., Pilot, R., Jones, S., & Burris, H. A. (2015). Electrocardiographic effects of class 1 selective histone deacetylase inhibitor romidepsin. *Cancer Medicine*, 4(8), 1178–1185. <https://doi.org/10.1002/cam4.467>
- Sahnoun, M., Trabelsi, S., & Bejar, S. (2017). Citrus flavonoids collectively dominate the α -amylase and α -glucosidase inhibitions. *Biologia*, 72(7), 764–773. <https://doi.org/10.1515/biolog-2017-0091>
- Sami, A., Javed, A., Ozsahin, D. U., Ozsahin, I., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2025). Genetics of diabetes and its complications: a comprehensive review. *Diabetology & Metabolic Syndrome*, 17(1), 185. <https://doi.org/10.1186/s13098-025-01748-y>
- Singh, S., Kriti, M., K.S., A., Sarma, D. K., Verma, V., Nagpal, R., Mohania, D., Tiwari, R., & Kumar, M. (2024). Deciphering the complex interplay of risk factors in type 2 diabetes mellitus: A comprehensive review. *Metabolism Open*, 22, 100287. <https://doi.org/10.1016/j.metop.2024.100287>
- Srinivasan, T. (2011). Genetics, epigenetics, and pregenetics. *International Journal of Yoga*, 4(2), 47. <https://doi.org/10.4103/0973-6131.85484>
- Suchal, K., Malik, S., Khan, S., Malhotra, R., Goyal, S., Bhatia, J., Ojha, S., & Arya, D. (2017). Molecular Pathways Involved in the Amelioration of Myocardial Injury in Diabetic Rats by Kaempferol. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(5), 1001. <https://doi.org/10.3390/ijms18051001>
- Sun, B., Chen, H., Xue, J., Li, P., & Fu, X. (2023). The role of GLUT2 in glucose metabolism in multiple organs and tissues. *Molecular Biology Reports*, 50(8), 6963–6974. <https://doi.org/10.1007/s11033-023-08535-w>

- Teaney, N. A., & Cyr, N. E. (2023). FoxO1 as a tissue-specific therapeutic target for type 2 diabetes. *Frontiers in Endocrinology*, *14*. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1286838>
- Tobon-Velasco, J., Cuevas, E., & Torres-Ramos, M. (2014). Receptor for AGEs (RAGE) as Mediator of NF- κ B Pathway Activation in Neuroinflammation and Oxidative Stress. *CNS & Neurological Disorders - Drug Targets*, *13*(9), 1615–1626. <https://doi.org/10.2174/1871527313666140806144831>
- Tompkins, J. D. (2022). Discovering DNA Methylation, the History and Future of the Writing on DNA. *Journal of the History of Biology*. <https://doi.org/10.1007/s10739-022-09691-8>
- Wagh, K., Kirpich, A., & Chowell, G. (2025). The Future Diabetes Mortality: Challenges in Meeting the 2030 Sustainable Development Goal of Reducing Premature Mortality from Diabetes. *Journal of Clinical Medicine*, *14*(10), 3364. <https://doi.org/10.3390/jcm14103364>
- Wang, D., Li, Y., Zhai, Q., Zhu, Y., Liu, B., & Xu, Y. (2021). Quercetin ameliorates testosterone secretion disorder by inhibiting endoplasmic reticulum stress through the miR-1306-5p/HSD17B7 axis in diabetic rats. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*. <https://doi.org/10.17305/bjbms.2021.6299>
- Wang, F., Fan, K., Zhao, Y., & Xie, M.-L. (2021). Apigenin attenuates TGF- β 1-stimulated cardiac fibroblast differentiation and extracellular matrix production by targeting miR-155-5p/c-Ski/Smad pathway. *Journal of Ethnopharmacology*, *265*, 113195. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113195>
- Wang, S., Sheng, H., Bai, Y., Weng, Y., Fan, X., Zheng, F., Fu, J., & Zhang, F. (2021). Inhibition of histone acetyltransferase by naringenin and hesperetin suppresses Txnip expression and protects pancreatic β cells in diabetic mice. *Phytomedicine*, *88*, 153454. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2020.153454>
- Wu, E., Zhu, Y., Wei, Q., Lu, H., Zou, Y., Liu, F., & Li, Q. (2025). Inhibition Mechanism of Mulberry Prenylated Flavonoids Sanggenone D/Kuwanon G Against α -Glucosidase and the Regulation of Glucose via GLUT4 Pathway. *Nutrients*, *17*(9), 1539. <https://doi.org/10.3390/nu17091539>
- Xu, Z., Tong, Q., Zhang, Z., Wang, S., Zheng, Y., Liu, Q., Qian, L., Chen, S., Sun, J., & Cai, L. (2017). Inhibition of HDAC3 prevents diabetic cardiomyopathy in OVE26 mice via epigenetic regulation of DUSP5-ERK1/2 pathway. *Clinical Science*, *131*(15), 1841–1857. <https://doi.org/10.1042/CS20170064>
- Yan Dai and Douglas V. Faller. (2008). Transcription Regulation by Class III Histone Deacetylases (HDACs) — Sirtuins. *Translational Oncogenomics*, *1*, 53–65. <https://doi.org/10.4137/TOG.S483>

- Yang, L., Qiu, Y., Ling, W., Liu, Z., Yang, L., Wang, C., Peng, X., Wang, L., & Chen, J. (2021). Anthocyanins regulate serum adiponin and visfatin in patients with prediabetes or newly diagnosed diabetes: a randomized controlled trial. *European Journal of Nutrition*, 60(4), 1935–1944. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02379-x>
- Yang, X. H., Zhang, B. L., Zhang, X. M., Tong, J. D., Gu, Y. H., Guo, L. L., & Jin, H. M. (2020). EGCG Attenuates Renal Damage via Reversing Klotho Hypermethylation in Diabetic db/db Mice and HK-2 Cells. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2020/6092715>
- Yoon, S., & Eom, G. H. (2016). HDAC and HDAC Inhibitor: From Cancer to Cardiovascular Diseases. *Chonnam Medical Journal*, 52(1), 1. <https://doi.org/10.4068/cmj.2016.52.1.1>
- Zhang, P., & Gregg, E. (2017). Global economic burden of diabetes and its implications. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 5(6), 404–405. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(17\)30100-6](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(17)30100-6)
- Zhang, X.-T., Wang, G., Ye, L.-F., Pu, Y., Li, R.-T., Liang, J., Wang, L., Lee, K. K. H., & Yang, X. (2020). Baicalin reversal of DNA hypermethylation-associated Klotho suppression ameliorates renal injury in type 1 diabetic mouse model. *Cell Cycle*, 19(23), 3329–3347. <https://doi.org/10.1080/15384101.2020.1843815>
- Zhong, J., Xu, C., Reece, E. A., & Yang, P. (2016). The green tea polyphenol EGCG alleviates maternal diabetes-induced neural tube defects by inhibiting DNA hypermethylation. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 215(3), 368.e1-368.e10. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2016.03.009>

FARMACOTERAPIA DE LA ESCLEROSIS MÚLTIPLE: FÁRMACOS APROBADOS, DIANAS MOLECULARES Y CONSIDERACIONES FARMACOGENÉTICAS²³

PHARMACOTHERAPY OF MULTIPLE SCLEROSIS: APPROVED DRUGS, MOLECULAR TARGETS, AND PHARMACOGENETIC CONSIDERATIONS

109

Cristian Paz²⁴

Sofía Bravo Bouchat²⁵

Cecilia Villegas²⁶

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.²⁷

²³Derivado del proyecto de investigación: Farmacoterapia de la esclerosis múltiple: Fármacos aprobados, dianas moleculares y consideraciones farmacogenéticas

²⁴ Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Medicina, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

cristian.paz@ufrontera.cl

²⁵sofibrabou@gmail.com

²⁶Departamento de Ciencias Biológicas y Químicas, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Católica de Temuco, Rudecindo Ortega, Temuco, Chile. cecilia.villegas@uct.cl

²⁷Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

La esclerosis múltiple (EM) es una enfermedad inflamatoria crónica del sistema nervioso central caracterizada por brotes neurológicos y progresiva discapacidad. Afecta a aproximadamente 2,8 millones de personas en el mundo, con mayor prevalencia en mujeres y diagnóstico habitual entre los 20 y 40 años de edad. Desde la aprobación del interferón β -1a en 1993 y del acetato de glatirámero, las posibilidades de tratamiento se han ampliado con la aprobación de moduladores del receptor de esfingosina-1-fosfato, agentes orales como teriflunomida y dimetil fumarato y anticuerpos monoclonales dirigidos a CD20, CD52 y α 4-integrina. Cada grupo farmacológico presenta un perfil de administración, eficacia y efectos adversos diferenciado, lo que permite adaptar el tratamiento al curso clínico y al perfil de riesgo de cada paciente. Por otra parte, los estudios en farmacogenética han identificado polimorfismos que modulan la respuesta y tolerancia a fármacos específicos, abriendo la puerta a una medicina cada vez más personalizada. En conjunto, esta revisión sintetiza los fármacos desarrollados para el control de la actividad inflamatoria y la reducción de brotes. Además, subraya la necesidad de enfoques multidisciplinarios que integren el diagnóstico temprano, seguimiento por imagen y pruebas genéticas, para optimizar la eficacia y la seguridad de la farmacoterapia en EM.

PALABRAS CLAVE: Esclerosis múltiple, Interferón β , Moduladores de S1P, Anticuerpos monoclonales, Farmacogenética

ABSTRACT

This review provides a comprehensive overview of pharmacotherapeutic strategies in multiple sclerosis (MS). MS is a chronic inflammatory disease of the central nervous system characterized by neurological relapses and progressive disability. It affects approximately 2.8 million people worldwide, with higher prevalence in women and most diagnoses occurring between 20 and 40 years of age. Since the approval of interferon- β -1a in 1993 and glatiramer acetate, the therapeutic armamentarium has expanded to include sphingosine-1-phosphate receptor modulators, oral agents such as teriflunomide and dimethyl fumarate, and monoclonal antibodies targeting CD20, CD52, and α 4-integrin. Each drug class exhibits a distinct administration route, efficacy profile, and adverse-event spectrum, enabling treatment personalization based on clinical course and individual risk factors. Moreover, pharmacogenetic studies have identified polymorphisms that influence drug response and tolerability, paving the way for increasingly tailored medicine. Altogether, this review synthesizes advances in controlling inflammatory activity and reducing relapse rates and underscores the need for multidisciplinary approaches integrating early diagnosis, imaging follow-up, and genetic testing to optimize the efficacy and safety of MS pharmacotherapy.

Keywords: Multiple sclerosis; Interferon- β ; S1P modulators; Monoclonal antibodies; Pharmacogenetics

INTRODUCCION

La esclerosis múltiple (EM) es una enfermedad autoinmune crónica del sistema nervioso central (SNC), influenciada por factores genéticos y ambientales. El sistema inmune ataca por error la mielina, que es la capa protectora de los axones neuronales, interfiriendo en la transmisión de impulsos nerviosos (Racke, 2009). Esta patología se asocia a las células T (CD4⁺ o CD8⁺) autorreactivas, lo que produce activación de interleuquinas inflamatorias como IL-2, TNF e INF activando las células presentadoras de antígenos (CPA). La inflamación provoca la activación de macrófagos los que van a inducir lesiones en el tejido cerebral (Moreno, Esponda, Echazarreta, Triano, & Morales, 2012).

En el año 1868, el neurólogo Jean-Martin Charcot descubrió la triada de Charcot, caracterizada por temblor intencional, habla escandida o lenta y nistagmo (movimiento rápido de ojos). Estos síntomas se describieron como una triada de esclerosis múltiple, a la cual, el científico nombró esclerosis en placas, luego de encontrar placas características en el SNC de un paciente (Confavreux & Vukusic, 2008). En 1930 los avances en histología permitieron diferenciar la esclerosis múltiple de otras enfermedades desmielinizantes. Posteriormente se descubrió el papel del sistema inmune en la desmielinización y gracias a los avances en resonancia magnética y técnicas inmunológicas en 1990, se establecieron criterios diagnósticos más certeros. En el año 1993 se aprobó el primer tratamiento para la esclerosis múltiple, el Interferón β -1a.

La aparición de esta patología puede deberse a factores genéticos, como polimorfismos que sean importantes en la funcionalidad o diferenciación de las células T o el loci HLA-DRB1*15 que interfiere con la capacidad de presentar antígenos al sistema inmunitario. A su vez, existen factores ambientales como la infección por el virus Epstein-Barr (EBV), el tabaquismo y la deficiencia de vitamina D (Opazo et al., 2025). Actualmente la esclerosis múltiple es la segunda causa de discapacidad en adultos jóvenes después de los traumatismos, de allí la importancia de un buen manejo farmacológico, ya que un tratamiento precoz y adecuadamente ajustado puede retrasar la progresión de la discapacidad, reducir la acumulación de lesiones y mejorar la calidad de vida. En este contexto, la presente revisión tiene como objetivo proporcionar una visión integrada de la farmacoterapia para el tratamiento de esta enfermedad, abarcando los fármacos aprobados, sus dianas moleculares

y las consideraciones farmacogenéticas que influyen en la respuesta terapéutica. En concreto, se describen los mecanismos de acción de las principales clases de fármacos, desde interferones y moduladores de receptor S1P, hasta anticuerpos monoclonales y agentes de remielinización emergentes. Se analizan sus efectos sobre rutas moleculares claves y se discuten los polimorfismos genéticos que modulan su eficacia y seguridad.

1. Datos epidemiológicos

La esclerosis múltiple es la segunda causa de discapacidad en adultos jóvenes después de los traumatismos (Cohan et al., 2021). Según datos publicados en 2020, se estima que hay 2,8 millones de personas con EM en todo el mundo. La edad promedio al momento del diagnóstico fue de 34,5 años (Vargas Osses et al., 2024). La incidencia en mujeres es de 3,6 por 100.000 personas por año y en hombres es de 2 por 100.000 personas por año. El 80% de los que padecen la enfermedad evolucionan al tipo recurrente-remitente, el resto presenta la enfermedad como progresiva primaria, progresiva secundaria y progresiva recurrente (Oubiña et al., 2014). Los pacientes mayores de 50 años suelen ser diagnosticados en fases progresivas y con discapacidad, ya que muchos cuentan con comorbilidades asociadas al tabaquismo, depresión, hipertensión arterial e hipotiroidismo (Vargas Osses et al., 2024).

La esclerosis múltiple presenta una menor esperanza de vida que se reduce en unos 7 a 14 años en comparación con la población general y la mortalidad se detecta a partir de los 10 años de inicio de los síntomas.

No obstante gracias a los criterios diagnósticos actualizados, la tasa de mortalidad durante las últimas décadas ha disminuido considerablemente desde el año 2005 (Opazo et al., 2025), debido a la implementación de criterios McDonald lo que permite una detección temprana de la enfermedad, lo cual sumado a una mayor accesibilidad y variedad de tratamientos permite que la esperanza de vida vaya aumentando con los años (Opazo et al., 2025).

2. Presentación clínica de la EM

La esclerosis múltiple suele presentar un curso relapsante-remitente, caracterizado por brotes neurológicos focales que reflejan la actividad inflamatoria sobre el SNC. Patogénicamente, esta patología evoluciona a través de tres fases interrelacionadas: Inflamación perivenosa, desmielinización y gliosis. Comienza con la formación de lesiones

focales o placas, principalmente localizadas en la sustancia blanca del SNC y luego la enfermedad progresa a la desmielinización de las neuronas (Carretero Ares, Bowakim Dib, & Acebes Rey, 2001).

La mielina está compuesta por múltiples proteínas, las que se liberan cuando es destruida en el curso de la infección, como la PLP (proteína protolipídica) y MPB (proteína básica de mielina) (Moreno et al., 2012). Estas proteínas liberadas serán reconocidas por el complejo mayor de histocompatibilidad tipo II que activa a las células T (Moreno et al., 2012). Por último, la gliosis se activa y los astrocitos proliferan formando cicatrices en las áreas lesionadas impidiendo aún más la transmisión de señales nerviosas. Una vez que las células T penetran en el parénquima cerebral, tras atravesar la barrera hematoencefálica (BHE), el contacto con los antígenos diana desencadena una cascada de eventos que culmina con la formación de la placa inflamatoria desmielinizante aguda (Río Izquierdo & Montalban, 2009).

Las consecuencias de la desmielinización son enlentecimiento o bloqueo de la conducción nerviosa por desaparición de conducción saltatoria y exposición de K^+ de la membrana axónica, produciendo fatiga. El daño axonal causado por la desmielinización y una proliferación anormal del canal de Na^+ en la membrana, provoca degeneración neuronal y si este daño se acumula se asocia a una incapacidad irreversible de inflamación crónica, atrofia cerebral y progresión de la discapacidad. (Moreno et al., 2012) Anteriormente se asociaba la discapacidad con la desmielinización crónica, pero actualmente se asocia a la disfunción axonal, incluyendo transección axonal y degeneración walleriana (Racke, 2009).

Las etapas clínicas que permiten evaluar la progresión de la enfermedad se clasifican de la siguiente manera.

- *Forma recurrente recidivante (RR)*: Esta es la forma más frecuente y comprende un 83-90% de los casos. Se trata de episodios o brotes de disfunción neurológica algo reversibles que se repiten a lo largo del tiempo y van dejando pequeñas secuelas en el tiempo. (Carretero Ares et al., 2001).
- *Forma secundaria progresiva (PS)*: Aproximadamente el 50% de las formas RR aumentan su intensidad tras un periodo de 10 años, teniendo mayor número de brotes y secuelas. (Carretero Ares et al., 2001).

- *Forma primaria progresiva (PP)*: Sólo un 10% de los pacientes presentan esta forma que se inicia con brotes invalidantes, sin que responda al tratamiento (Carretero Ares et al., 2001).
- *Forma progresiva recurrente (PR)*: Corresponde a exacerbaciones o agravamientos ocasionales tras un curso progresivo. (Carretero Ares et al., 2001)
- *Forma benigna (FB)*: Es la forma que permite al paciente preservar su capacidad funcional en todo el sistema neurológico, incluso 10-15 años después de la presentación de la enfermedad, pudiendo derivar a la forma PS. (Carretero Ares et al., 2001)

3. Mecanismo fisiopatológico

En esclerosis múltiple ocurre una autorreactividad de linfocitos CD4+ (Th1 y Th17) los que presentan una activación periférica y proliferan en ganglios linfáticos, estos reconocerán por error antígenos de la mielina (Gold & Wolinsky, 2011). Th 17 secreta IL-17 provocando que la BHE sea más permeable y así facilita el paso a través de la barrera, promoviendo la inflamación local y desencadenando daño en la mielina. Además, ocurre una activación de moléculas de adhesión como VCAM-1 (Molécula de Adhesión Celular Vascular 1), ICAM-1 (Molécula de Adhesión intercelular-1), a causa de TNF- α (Factor de necrosis tumoral), e INF- γ (Interferón- γ), además de proteasas tipo MMP-9 que permiten que las células inmunes pasen por la barrera hematoencefálica (Gold & Wolinsky, 2011). A su vez los macrófagos y microglías son activadas las que fagocitan la mielina, liberando TNF- α y radicales libres lo que desencadena un daño axonal irreversible (Buzzard, Broadley, & Butzkueven, 2012). Por otra parte, los astrocitos reducen transportadores de glutamato y glutamina sintasa, provocando excitotoxicidad para oligodendrocitos y neuronas, por acumulación de glutamato.

Los axones que están desmielinizados requieren de más energía para su función, ocasionando una disfunción mitocondrial que genera un estado de hipoxia, con daño progresivo por estrés oxidativo y apoptosis neuronal. Aún en áreas aparentemente normales del cerebro hay una expresión de genes inflamatorios, además de enzimas inflamatorias como caspasa-1 y 5-lipooxigenasa. También presenta alteración en canales iónicos y en factores de

transcripción como CREB, que regula la actividad neuronal, esto lleva a una disfunción neuronal que afecta el funcionamiento cerebral.

Adicionalmente, se han identificado alteraciones epigenéticas en individuos portadores del alelo HLA-DRB1*15:01, incluyendo modificaciones en los patrones de metilación y una desregulación de los microARN miR-155, miR-326 y miR-34a. Estas alteraciones favorecen la diferenciación de linfocitos T-CD4+ autorreactivos, lo que incrementa la degradación de la mielina. Los receptores como MERTK (Receptor tirosina cinasa), regulan fagocitosis silenciosa de desechos celulares pero variantes genéticas y su alteración con HLA-DRB1 afectan la presentación antigénica en el curso de esclerosis múltiple (Dwyer et al., 2020).

Para detectar esta patología se utilizan técnicas de imagenología como la resonancia magnética nuclear, que permite visualizar las lesiones cerebrales y su naturaleza aguda (T1) o crónica (T2) (Carretero Ares et al., 2001). Otros métodos involucran la cuantificación de la síntesis intratecal de IgG y bandas oligoclonales (BOC) en líquido cefalorraquídeo (LCR) (Carretero Ares et al., 2001). También se utiliza la tomografía de coherencia óptica (OCT), la cual evalúa el grosor de la capa de fibras nerviosas de la retina. (Racke, 2009). La OCT se considera un marcador útil de daño axonal, ya que el grosor de la retina se correlaciona con la atrofia cerebral y el grado de discapacidad. (Racke, 2009)

4. Dianas moleculares involucradas en el tratamiento de la EM

El tratamiento farmacológico de la EM se basa en la intervención selectiva sobre componentes específicos del sistema inmunológico que participan en la fisiopatología de la enfermedad, lo que ha permitido el diseño de fármacos con mecanismos de acción más dirigidos, con mayor eficacia y menos efectos adversos. Esta sección describe las principales dianas terapéuticas en EM y explica su relevancia en la elección del tratamiento.

4.1 CD20: linfocitos B maduros

CD20 es una proteína de membrana expresada en linfocitos B desde fases intermedias de maduración hasta poco antes de su diferenciación en células plasmáticas. Su función no está completamente dilucidada en la EM, pero se ha demostrado que estas células juegan un rol esencial en la presentación antigénica, producción de citoquinas proinflamatorias y activación de linfocitos T. Los anticuerpos monoclonales anti-CD20, como ocrelizumab,

ofatumumab y rituximab, inducen una depleción selectiva de estas células mediante citotoxicidad dependiente de complemento o mediada por células (Gärtner et al., 2022; S. L. Hauser & Cree, 2020). Esta estrategia ha demostrado reducir significativamente los brotes y la progresión de la discapacidad.

4.2 CD52: linfocitos T, B, monocitos y macrófagos

CD52 es un antígeno expresado en diversas células inmunes maduras. El anticuerpo monoclonal alemtuzumab se une a esta diana provocando una depleción profunda y rápida de linfocitos T y B, monocitos y macrófagos. Posteriormente, ocurre una repoblación inmunológica con un perfil más tolerante. Esta inmunorreconstrucción permite reducir la actividad inflamatoria y modificar el curso de la enfermedad en pacientes con EM remitente-recurrente agresiva (Coles et al., 2012).

4.3 α 4-integrina (VLA-4): migración de linfocitos

Natalizumab es un anticuerpo monoclonal que actúa sobre la subunidad α 4-integrina, que forma parte del complejo VLA-4, crucial para la adhesión de linfocitos al endotelio vascular y su migración al SNC. Al bloquear esta interacción, natalizumab es altamente eficaz en reducir la actividad lesional y los brotes al impedir que las células inmunes atraviesen la barrera hematoencefálica y generen daño inflamatorio (Rudick et al., 2006; Yednock et al., 1992), aunque su uso prolongado se asocia con riesgo de leucoencefalopatía multifocal progresiva.

4.4 Receptores de esfingosina-1-fosfato (S1P1 y S1P5)

Los receptores de esfingosina-1-fosfato (S1P) regulan la migración de linfocitos desde los ganglios linfáticos hacia la circulación. Los moduladores funcionales de S1P, como fingolimod, siponimod y ozanimod, actúan como agonistas que inducen la internalización y desensibilización de estos receptores, provocando una "retención linfocitaria" en los ganglios (**Figura 1**) (Chun & Hartung, 2010; Cohen & Chun, 2011). Esto disminuye el número de linfocitos circulantes capaces de infiltrar el SNC. Algunos moduladores como siponimod también actúan sobre S1P5, presente en oligodendrocitos, lo que podría conferir efectos neuroprotectores.

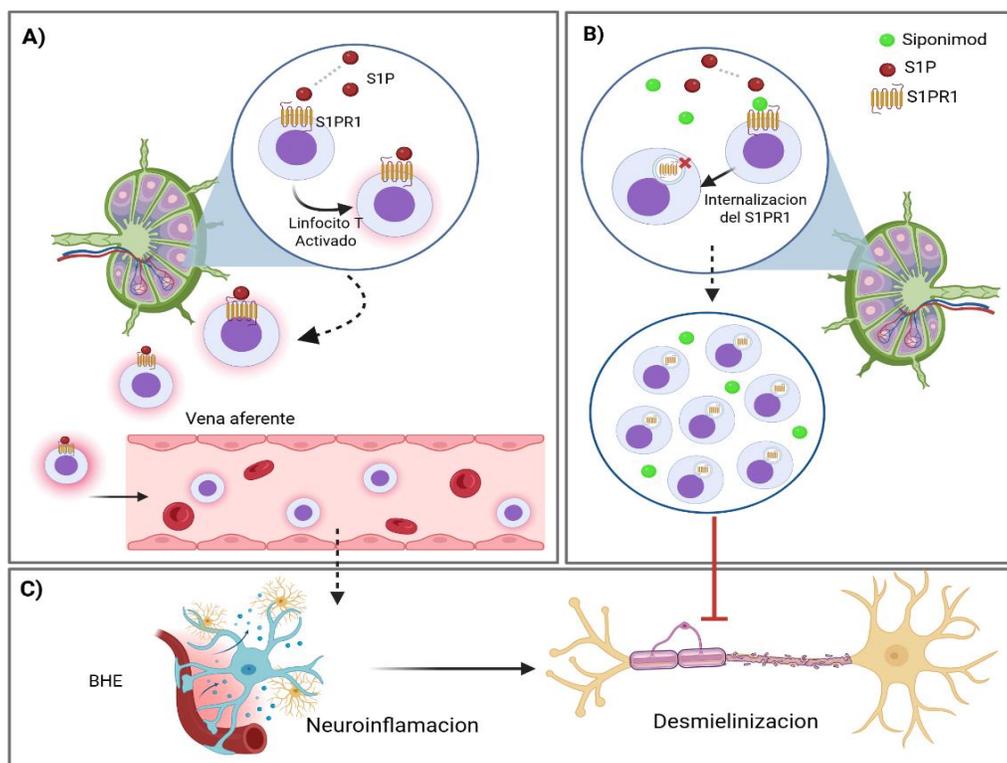


Figura 1. Moduladores del receptor de esfingosina-1-fosfato (S1PR1) reducen la migración linfocitaria y la neuroinflamación en esclerosis múltiple. **A)** En ausencia de tratamiento, la unión de S1P a S1PR1 permite que los linfocitos T activados abandonen el ganglio linfático a través de la vena eferente, alcancen la circulación y crucen la barrera hematoencefálica (BHE). **B)** Con moduladores de S1PR1 (p. ej., Siponimod; mecanismo análogo para Fingolimod y Ozanimod), el fármaco se acopla al receptor, induce su internalización y secuestra a los linfocitos dentro del ganglio, disminuyendo su recuento en sangre. La menor infiltración al SNC atenúa la cascada inflamatoria y la lesión desmielinizante **C)** Consecuencia en el SNC: la extravasación de linfocitos a través de la barrera hematoencefálica (BHE) desencadena neuroinflamación (izquierda), la cual progresa hacia la pérdida de mielina y el daño axonal característico de la desmielinización (derecha). S1P, esfingosina-1-fosfato; S1PR1, receptor de S1P tipo 1; BHE, barrera hematoencefálica.

4.5 Dihidroorotato deshidrogenasa (DHODH): proliferación de linfocitos activados

La enzima DHODH participa en la síntesis de novo de pirimidinas, crucial para la proliferación de células inmunes activadas. Teriflunomida, una molécula pequeña de administración oral inhibe esta enzima y limita la expansión de linfocitos activados sin

afectar las células en reposo, logrando un efecto inmunomodulador selectivo (Bar-Or, Pachner, Menguy-Vacheron, Kaplan, & Wiendl, 2014).

4.6. Dianas emergentes

La tirosina quinasa de Bruton (BTK) es una enzima no-receptora indispensable para el desarrollo, diferenciación y señalización de los linfocitos B, está implicada en la activación de linfocitos B y células mieloides. Los inhibidores de BTK se investigan como tratamiento potencial que podría modular la inflamación sin depleción celular completa (Schneider & Oh, 2022). Otras dianas en exploración incluyen canales iónicos, como los canales de potasio Kv1.3, involucrados en la activación de linfocitos T autorreactivos (Wulff et al., 2003), así como microARNs, que modulan la expresión génica postranscripcional y participan en procesos inmunológicos y neurodegenerativos (Junker, 2011). Además, factores relacionados con la remielinización, como LINGO-1, han sido objeto de estudio debido a su papel inhibitorio sobre la diferenciación de oligodendrocitos, y su bloqueo podría favorecer la reparación de la mielina (Mi et al., 2005).

Por otra parte, las vías de señalización intracelular como NF- κ B y Nrf2 han despertado interés como blancos terapéuticos. Es sabido que la activación sostenida de NF- κ B se asocia con la perpetuación de la inflamación y la neurodegeneración. Si bien en la actualidad, no existen inhibidores directos de esta vía aprobados para uso clínico en EM, el dimetilfumarato (DMF), una molécula pequeña aprobada por la FDA ejerce parte de su acción terapéutica inhibiendo indirectamente NF- κ B al activar la vía antioxidante del factor nuclear eritroide 2 relacionado con el factor 2 (Nrf2). La activación de Nrf2 es de relevancia en el tratamiento de la EM porque regula genes que codifican enzimas antioxidantes y citoprotectoras, las cuales ayudan a neutralizar el estrés oxidativo en el SNC.

En la EM el estrés oxidativo se incrementa por la infiltración de células inmunes y la activación de la microglía, lo que da lugar a la producción de radicales libres (ROS) que dañan neuronas, axones y oligodendrocitos. Al activarse, Nrf2 se transloca al núcleo, donde induce la expresión de genes como HO-1 (hemo oxigenasa-1), NQO1 (quinona oxidoreductasa 1) y GCLC (glutamato-cisteína ligasa), fundamentales para proteger a las células del daño oxidativo. El fármaco dimetilfumarato, no solo tienen efectos inmunomoduladores, sino también efectos neuroprotectores, al preservar la integridad

estructural del tejido nervioso y reducir la progresión de la discapacidad. Esta propiedad añade un valor terapéutico adicional frente a otros agentes puramente inmunosupresores (Gold et al., 2012; Linker et al., 2011).

5. Abordaje farmacológico de la esclerosis múltiple

El tratamiento farmacológico de la EM ha evolucionado sustancialmente en las últimas décadas, mejorando la calidad de vida de los pacientes. Durante un brote agudo, el objetivo es reducir la inflamación y acelerar la recuperación funcional. Los corticosteroides, especialmente la metilprednisolona intravenosa en dosis altas (1 g/día durante 3 a 7 días), son el tratamiento de elección en estos casos. Este esquema puede continuarse con una pauta descendente de corticosteroides orales por 15-30 días. En brotes severos resistentes, se consideran alternativas como la administración de inmunoglobulinas intravenosas o la plasmaféresis, aunque con menor nivel de evidencia (Fernández, Fernández, & Guerrero, 2015). Sin embargo, la EM es una patología incurable, por lo que el objetivo principal del tratamiento en el tiempo es retrasar la progresión y preservar la calidad de vida del paciente, por lo que debe ser individualizado. Dicha individualización considera la forma clínica, la actividad inflamatoria, el perfil de riesgo del paciente, su respuesta previa al tratamiento y la etapa de la enfermedad (S. L. Hauser & Cree, 2020).

Las “Terapias modificadoras de la enfermedad” (DMTs, por sus siglas en inglés) usan fármacos diseñados específicamente para alterar el curso de la EM, reduciendo la inflamación, los brotes y la progresión (McGinley, Goldschmidt, & Rae-Grant, 2021). Estas terapias se clasifican según su mecanismo de acción y se seleccionan según la forma clínica de EM, se distingue el uso de tres tipos de tratamientos.

6. Fármacos aprobados por la FDA para uso clínico en la EM

6.1 Interferones beta (IFNB) y acetato de glatirámero

Los interferones beta (IFNB-1a y 1b) y el acetato de glatirámero fueron las primeras terapias inmunomoduladoras aprobadas para la EMRR. Aunque a menudo se mencionan juntos por su perfil de eficacia y seguridad similar, tienen mecanismos de acción diferentes y pertenecen a clases distintas de fármacos. Los Interferones beta y son proteínas recombinantes que modulan la respuesta inmunitaria al inducir la producción de citoquinas antiinflamatorias,

inhibir la activación de linfocitos T y reforzar la barrera hematoencefálica. Su eficacia clínica se traduce en una reducción del 29–34% en la tasa anual de brotes y una menor aparición de lesiones nuevas (**Figura 1**). Por otra parte, el acetato de glatirámero es un polipéptido sintético que imita la proteína básica de la mielina. Induce linfocitos T reguladores que liberan citoquinas antiinflamatorias, desviando la respuesta inmune hacia una vía no patológica, comparte con los interferones una vía de administración subcutánea y un perfil de seguridad favorable. Su eficacia también se considera moderada (Fernández et al., 2015; McGinley et al., 2021).

6.2 Interferón beta-1a

Los IFN se descubrieron en 1957 durante las investigaciones sobre los mecanismos de interferencia viral (Cohan et al., 2021). El tratamiento de interferón beta-1a se obtiene mediante tecnología de ADN recombinante en células de ovario de hámster chino, lo que permite obtener una proteína glicosilada idéntica al interferón beta humano natural. Su mecanismo de acción cuenta con la regulación positivamente la expresión de las proteínas del complejo mayor de histocompatibilidad clase 1, esto produce una mayor presentación de péptidos de antígenos virales. Esto permite la activación de linfocitos T CD8+, precursores de los linfocitos T citotóxicos y convierte al macrófago en un objetivo eficaz para la destrucción mediada por Linfocito T citotóxico. Los interferones tipo I también inducen la síntesis de varios mediadores antivirales permitiendo así regular la respuesta inmune, disminuyendo la inflamación del SNC. El IFN β también promueve la producción de la citocina antiinflamatoria y tolerogénica interleucina-10 (IL-10). Los niveles bajos de IL-10 se asocian con un riesgo elevado de desarrollar enfermedades autoinmunes (Cohan et al., 2021). Este se considera tratamiento de primera línea para el manejo de la EM (Navarro et al., 2020).

6.3 Interferón beta-1b

IFN beta-1b es una variante recombinante del interferón beta humano, este medicamento constituye actualmente el tratamiento más utilizado con el fin de reducir la progresión de la enfermedad. Su mecanismo de acción se resume en la **Figura 1**. (Carretero Ares et al., 2001). El interferón b-1b es un medicamento que se administra por la vía intramuscular (Cohan et al., 2021) algunos efectos secundarios son la elevación moderada de transaminasas, el letargo, confusión y torpeza mental, la parálisis de pares craneales,

parestesias y neuropatías periféricas (Moreno et al., 2012). Este fármaco fue aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) como la primera terapia modificadora de la enfermedad (TME) para la esclerosis múltiple en 1993(Cohan et al., 2021).

6.4 Peginterferón beta-1a

Peginterferón beta-1a es una versión modificada que prolonga la vida media y actividad (Kieseier et al., 2015). Está compuesto de IFN beta-1a conjugado con Metoxipolietilenglicol (mPEG) (Reuss, 2013). Específicamente, el IFN-beta disminuye la presentación de antígenos y la proliferación de linfocitos T. Además, modifica la expresión de citocinas y metaloproteinasas de matriz (MMP), a la vez que restaura la función supresora. El tratamiento con Interferón beta presenta una rápida degradación o eliminación renal, por lo cual requieren inyecciones frecuentes, para mejorar el tratamiento se desarrolla esta técnica es especialmente útil para proteínas pequeñas (Reuss, 2013). Aunque los estudios preclínicos han mostrado posibles efectos renales con proteínas PEGiladas en dosis elevadas, estos hallazgos aún deben ser evaluados en estudios de fase IV en humanos. También será importante investigar el impacto de los anticuerpos anti-PEG (Reuss, 2013). Peginterferón beta-1a fue aprobado por la FDA por la reducción de recaídas de esclerosis múltiple y la progresión de la discapacidad y lesiones cerebrales asociadas a esta patología al reducir la inflamación.

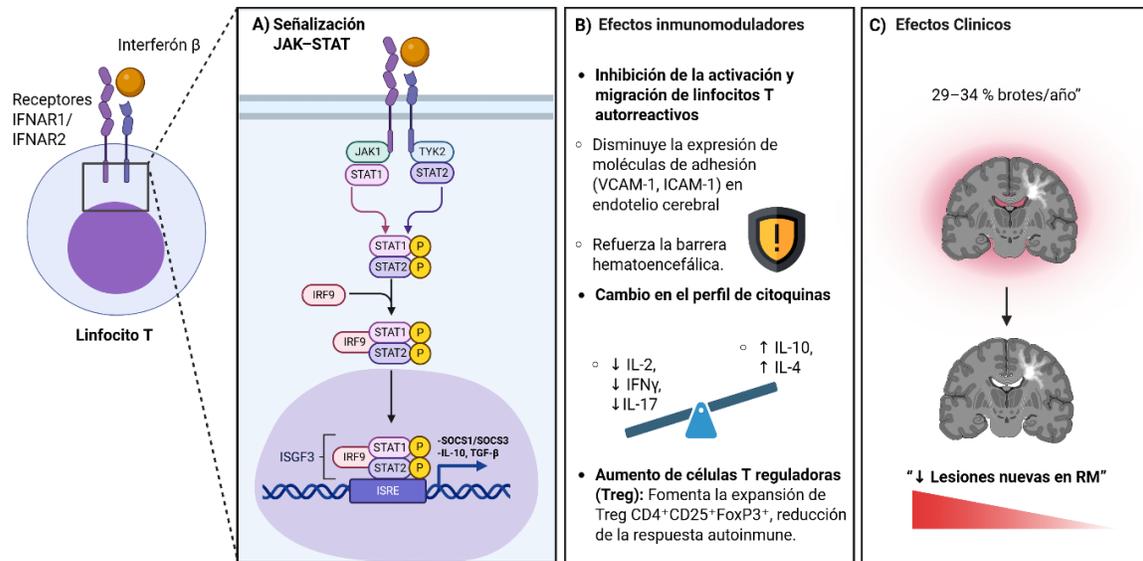


Figura 1. Mecanismo de acción de IFN β -1a y IFN β -1b en la esclerosis múltiple remitente-recurrente. A) En las células diana (linfocitos T), IFN β se une al heterodímero de receptores IFNAR1/IFNAR2 en la membrana, reclutando y activando la tirosina quinasas JAK1 y TYK2. Estas fosforilan a STAT1 y STAT2, que se asocian con IRF9 para formar el complejo ISGF3, el cual transloca al núcleo y se une a elementos ISRE del ADN. **B)** Resultado de la inducción de genes estimulados por interferón (ISGs). **C)** Clínicamente, estos efectos inmunomoduladores se traducen en una disminución del 29–34 % en la tasa anual de brotes y en la aparición de nuevas lesiones detectables por resonancia magnética.

6.5 Fármacos orales (moléculas pequeñas)

Son compuestos orgánicos con bajo peso molecular, generalmente inferior a 900 Daltons. cuyo tamaño compacto les permite difundir fácilmente a través de las membranas celulares. Fingolimod fue el primer fármaco aprobado de esta clase y junto ozanimod y siponimod, han mostrado eficacia superior a interferones en estudios comparativos (S. L. Hauser & Cree, 2020). La **Tabla 1** resume el mecanismo de acción de cada una de las moléculas pequeñas aprobadas para el tratamiento de la EM, así como el nombre con el cual se comercializan actualmente, mientras que la **Figura 3** muestra su estructura química.

Tabla 1. Clasificación de moléculas pequeñas para el tratamiento de esclerosis múltiple.

Molécula	Aprobación	Diana terapéutica	Nombre comercial	Peso molar (g/mol)
Fingolimod	2010	Modulador del receptor S1P1	Fingomolid accord, Mylan, Gilenya, Tascenso	307
Fumarato de diroximel	2019	Activa vía antioxidante por factor Nrf2	Vumerity	144
Fumarato de monometilo	2020	Activa vía antioxidante por factor Nrf2	Bafiertam	144
Fumarato de siponimod	2019	Modulador selectivo de S1P1 y S1P5	Siponimod	517
Dalfampridina	2010	Bloquea canales de K ⁺	Ampyra, Fampridine Accord, Fampyra	159
Atalureno	2014	Favorece la lectura de codones de terminación prematura en ARNm	Ataluen	165
Acetato de glatiramer	1996	Mimetiza proteína básica de la mielina (MBP), dirigiendo respuesta a linfocitos Th2	Copaxone, Glatect, Glatopa	623
Teriflunomida	2012	Inhibe dihidroorotato deshidrogenasa (DHODH).	Aubagio, Teriflunomida Accord, Teriflunomida Mylan	270

124

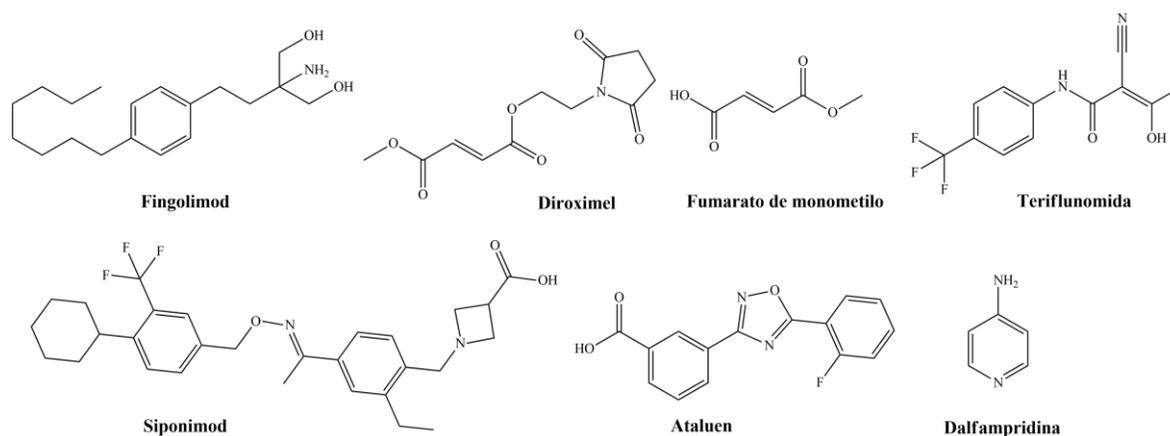


Figura 3. Moléculas pequeñas aprobadas por la FDA para el tratamiento de la Esclerosis múltiple

- **Fingolimod**

El Fingolimod es una molécula derivada de un aminoácido con actividad inmunosupresora (miriocina) aislado desde el hongo *Isaria sinclairii* (Chiba, 2020). Este fármaco es un modulador del receptor de esfingosina-1-fosfato(S1p), el que fosforila a S1P en linfocitos e induce una internalización aberrante del receptor, impidiendo a las células salir de los tejidos linfoides secundarios, produciendo el secuestro de linfocitos en ganglios, impide que estas células infiltren lesiones inflamatorias del SNC. Ejerce potentes efectos antiinflamatorios en la esclerosis múltiple (EM) recurrente-remitente. Fingolimod podría ser una de las primeras terapias farmacológicas orales disponibles para el tratamiento de la esclerosis múltiple recurrente-remitente. (Aktas, Küry, Kieseier, & Hartung, 2010).

- **Fumarato de diroximel**

El fumarato de diroximel es un nuevo fármaco de la clase de los fumaratos, formulado para tratar diversas formas recurrentes de esclerosis múltiple. Este fármaco es bioequivalente al dimetilfumarato, pero es menos probable que cause efectos secundarios gastrointestinales gracias a su estructura química única. Actualmente, el mecanismo de acción de este fármaco en EM no se comprende completamente, pero produce efectos beneficiosos para el sistema inmunitario y la neuroprotección. (Khatri et al., 2015)

- **Fumarato de monometilo (MMF, Bafiertam)**

MMF o Bafiertam es un fármaco de administración oral, derivado de ácido fumárico, un compuesto natural extraído de hongos como *Fomes fomentarius* (Rousseau, Wang, Sprague, Lategan, & Berkovich, 2023). Este activa la vía Nrf2 causando neuroprotección, pero puede producir efectos secundarios que incluyen sofocos, enrojecimiento, picazón o sarpullido. También incluyen náuseas, vómitos, diarrea, dolor de estómago o indigestión. (Berger et al., 2021).

- **Fumarato de siponimod**

Este fármaco es un modulador selectivo del receptor de esfingosina 1-fosfato (S1PR) y participa en varios procesos inmunitarios, cardiovasculares y del SNC (Scott, 2020). Está aprobado para tratar esclerosis múltiple progresiva secundaria (EMSP). Es un fármaco de nueva generación que su mecanismo de acción es internalizar los receptores S1P1, inhibiendo así el eflujo de linfocitos de los ganglios linfáticos y el timo. Existen datos prometedores que

sugieren que también podría tener una propiedad neuroprotectora directa (Goodman, Anadani, & Gerwitz, 2019).

- **Dalfampridina / 4-aminopiridina**

Este es un fármaco utilizado para mejorar la marcha en pacientes con esclerosis múltiple con dificultad para caminar, ya que ha demostrado un aumento en la velocidad mediante el bloqueo de los canales de potasio lo que mejora la conducción de axones desmielinizados de animales. En axones mielinizados normales hay una propagación normal de potenciales de acción, sin embargo, la zona entre los nódulos está cubierta de mielina, contiene una mayor cantidad de canales de potasio, dificultando la generación de potenciales de acción. (Lamore Iii, Jacob, Jacob, & Hilas, 2010). La dalfampridina aumenta la amplitud y la duración de la conducción nerviosa, lo que resulta en una conducción nerviosa enriquecida en nervios (Lamore Iii et al., 2010).

- **Ataluren**

Ataluren (Translarna) es un compuesto de administración por vía oral actúa sobre las mutaciones sin sentido, es el primer fármaco de su clase (Ryan, 2014). Su mecanismo de acción parece permitir que la maquinaria celular lea a través de los codones de terminación prematuros del ARNm, lo que permite que el proceso de traducción produzca proteínas funcionales de longitud completa. Una nueva terapia con el potencial de tratar una amplia gama de trastornos genéticos debidos a mutaciones sin sentido. (Ryan, 2014)

- **Acetato de glatiramer**

El glatiramer es un inmunomodulador utilizado para reducir la frecuencia de recaídas en la esclerosis múltiple (Sandoval et al., 2013). Este fármaco no atraviesa la barrera hematoencefálica, su mecanismo de acción es presentar un potencial inmunomodulador sobre células específicas del sistema inmune que responden a la proteína básica de mielina. Existe una competencia por la unión del acetato de glatiramer vs. MBP (proteína básica de la mielina) a moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad, además de competencia de unión del complejo acetato de glatiramer MHC vs. complejo MBP/MHC al receptor de célula T, luego se Activa la tolerancia de células T específicas contra MBP y ocurre una inducción de células Th2 reguladoras (Sandoval et al., 2013).

- **Teriflunomida**

La teriflunomida es un inmunomodulador, es el metabolito activo de la leflunomida y posee propiedades antiproliferativas y antiinflamatorias (Oubiña et al., 2014). Su mecanismo de acción es que actúa inhibiendo la enzima (DHOD), esencial para la síntesis de pirimidinas en linfocitos T, B y otras células (Miguel Toquero, 2017) (Godina, 2023). Esta tiene un efecto citostático sobre los linfocitos en su proliferación, alterando la interacción de células T con las células presentadoras de antígeno. Además, inhibe la actividad de tirosina quinasa, lo que reduce la proliferación de linfocitos T y producción de ciertas citoquinas (Oubiña et al., 2014). Evidencia preclínica demuestra la capacidad de modificar el curso de la encefalomiелitis autoinmune modelo animal de la esclerosis múltiple (Godina, 2023). Algunos estudios realizaron una comparación entre terapias las cuales se favorece el uso de teriflunomida frente los otros medicamentos en la patología. (Navarro, Ordóñez-Callamand, & Alzate, 2020). Algunos efectos adversos incluyen toxicidad hepática y teratogenicidad, por lo que se deben tomar precauciones en pacientes con riesgo hepático y en mujeres en edad fértil (Oubiña et al., 2014).

6.6 Anticuerpos monoclonales

Los anticuerpos monoclonales son proteínas diseñadas para unirse específicamente a estructuras celulares implicadas en la patogenia de la esclerosis múltiple. Al reconocer de forma precisa estas dianas inmunológicas, permiten interferir en etapas clave del proceso inflamatorio y autoinmune que caracteriza a la enfermedad. Su principal finalidad terapéutica es impedir la infiltración de células inmunes al SNC o eliminar poblaciones celulares involucradas en la respuesta autoinmune. Actualmente, se han aprobado varios anticuerpos monoclonales entre los que destacan Natalizumab (anti- α 4-integrina), Ocrelizumab (anti-CD20), Ofatumumab (anti-CD20), Alemtuzumab (anti-CD52) siendo los más eficaces en la reducción de brotes (hasta un 68%) y en la prevención de nuevas lesiones cerebrales. El uso de esta terapia se promueve de manera temprana en pacientes con alta actividad inflamatoria o mal control con terapias de eficacia moderada (Krajnc, Bsteh, Berger, Mares, & Hartung, 2022).

- **Natalizumab**

Este medicamento es un anticuerpo humanizado monoclonal el cual participa como un inhibidor de integrinas $\alpha 4$, es el primer anticuerpo autorizado para el tratamiento de la EM remitente-recurrente. (Alejandro Horga et al., 2011). Su mecanismo de acción es mediante el bloqueo la interacción entre la integrina $\alpha 4\beta 1$ leucocitaria y su receptor endotelial VCAM-1, impidiendo la transmigración de leucocitos a través de la barrera hematoencefálica hacia el parénquima del SNC. (Alejandro Horga et al., 2011; A. Horga & de la Parte, 2007). Según estudios Natalizumab en monoterapia redujo el riesgo de progresión sostenida de la discapacidad en un 42% y la tasa de brotes en un 68% después de dos años. (A. Horga & de la Parte, 2007). A pesar de su considerable eficacia, el uso de Natalizumab se halla restringido debido a que se han comunicado varios casos de leucoencefalopatía multifocal progresiva, una grave infección oportunista del SNC, en pacientes que recibían este fármaco (A. Horga & de la Parte, 2007).

- **Ocrelizumab**

El Ocrelizumab es un anticuerpo monoclonal humanizado que se dirige selectivamente a CD20, un antígeno de superficie celular que se expresa en células B, pero no en células madre linfoides y células plasmáticas (Stephen L. Hauser et al., 2017). El objetivo de anticuerpo anti-CD20 humanizado es disminuir la inmunogenicidad, lo que se demostró en un estudio de fase 2. Ocrelizumab se une a CD20 con afinidad, agotando selectivamente a las células B que expresan CD20, se presenta una disminución de células B mediante mecanismos como la fagocitosis y citotoxicidad mediada por células dependiente de anticuerpos, la citotoxicidad también dependiente del complemento y la inducción de apoptosis (Stephen L. Hauser et al., 2017). Se cree que las células B influyen en la patogénesis subyacente de la esclerosis múltiple mediante la presentación de antígenos, la producción de autoanticuerpos, la regulación de citocinas, y la formación de agregados linfoides ectópicos en las meninges, que posiblemente contribuyen a la desmielinización cortical y la neurodegeneración (Stephen L. Hauser et al., 2017).

Tabla 3: Resumen de moléculas biológicas utilizadas para el tratamiento de esclerosis múltiple.

Molécula	Año de aprobación	Diana terapéutica	Nombre comercial	Masa Molar
Interferón beta-1a	1996	Inhibe Células T disminuyendo permeabilidad de la barrera hematoencefálica.	Avonex	22 kDa (monómero) 41.6kDa (Dímero)
Interferón B-1b	1993	Modula citoquinas disminuye migración al SNC.	Betaseron	20 kDa
Natalizumab	2004	Ac monoclonal contra integrina $\alpha 4$ en leucocitos.	Tysabri	149 kDa
Ocrelizumab	2017	Destruye anticuerpo monoclonal anti-CD20.	Ocrevus, Ocrevus Zunovo	150 kDa 151

7. Enfoques terapéuticos según la etapa de la enfermedad

La EMRR es la forma más común de presentación, especialmente en mujeres jóvenes. Se caracteriza por episodios de exacerbación (brotos) seguidos de recuperación parcial o completa. El objetivo principal del tratamiento en esta etapa es suprimir la inflamación temprana. Tradicionalmente se empleaba una estrategia de escalamiento terapéutico, comenzando con interferones o acetato de glatirámero. Sin embargo, la evidencia actual favorece el uso temprano de anticuerpos monoclonales (natalizumab, ocrelizumab, ofatumumab) o algunos moduladores del receptor S1P, en pacientes con alta carga inflamatoria (S. L. Hauser & Cree, 2020; McGinley et al., 2021). Esta aproximación ha demostrado una mayor efectividad en la prevención del daño neurológico a largo plazo y en la reducción de la actividad en resonancia magnética.

La EMPS aparece en pacientes con EMRR que, tras un tiempo, presentan progresión clínica sin brotes. Esta fase se caracteriza por una neurodegeneración más pronunciada, aunque puede coexistir con inflamación subclínica o brotes esporádicos. En pacientes con actividad inflamatoria demostrada (ya sea clínica o por RM), se ha aprobado el uso de

ocrelizumab y siponimod, una molécula pequeña que actúa como modulador selectivo de los receptores S1P1 y S1P5. Siponimod limita la migración de linfocitos al SNC al retenerlos en los ganglios linfáticos, reduciendo así la inflamación local y enlenteciendo la progresión de la discapacidad (McGinley et al., 2021; Piehl, 2021). Las moléculas pequeñas como siponimod, ozanimod y los fumaratos (dimetilfumarato, diroximel fumarato) presentan ventajas relevantes en esta etapa, ya que se administran por vía oral, mejorando la adherencia, poseen perfiles farmacocinéticos predecibles, pueden cruzar la barrera hematoencefálica, permitiendo actuar directamente en el SNC, lo cual es particularmente útil en fases con menor componente inflamatorio periférico. En esta etapa estos fármacos representan una alternativa en pacientes que no toleran bien terapias biológicas o tienen contraindicaciones para su uso. Además, su utilización temprana durante la fase remitente puede tener un impacto positivo en retrasar la transición hacia formas progresivas.

La EMPP, que representa el 10–15% de los casos de EM, tiene un curso progresivo desde el inicio, sin brotes definidos y con acumulación gradual de discapacidad neurológica. A menudo predomina el deterioro motor, con menor evidencia de inflamación visible por RM o en líquido cefalorraquídeo (LCR). Actualmente, ocrelizumab es el único tratamiento aprobado para EMPP con eficacia demostrada en reducir la progresión clínica. Sus beneficios son más evidentes en pacientes jóvenes y en aquellos con actividad inflamatoria activa o lesional en RM (S. L. Hauser & Cree, 2020). En ausencia de inflamación activa, las opciones terapéuticas son limitadas, y el enfoque se centra en la rehabilitación neurológica, manejo sintomático y soporte multidisciplinario.

8. Polimorfismos genéticos y respuesta a fármacos en esclerosis múltiple

La respuesta DMTs en la EM varía ampliamente entre individuos, por lo que el estudio de polimorfismos genéticos como posibles biomarcadores para predecir la eficacia, la toxicidad o la necesidad de ajustar dosis representa una variable importante a considerar. A continuación, se describen algunos de los polimorfismos más relevantes estudiados hasta la fecha asociados a las drogas de uso en la EM:

8.1 Polimorfismos en la vía del interferón tipo I

IFNAR1, *IRF5* y *MX1* participan en la señalización de los interferones beta. Polimorfismos en estos genes se asocian con menor respuesta clínica al tratamiento, mayor tasa de brotes,

mayor carga lesional en resonancia magnética y mayor probabilidad de desarrollar anticuerpos neutralizantes (Coyle, 2017). Por otra parte, la presencia del alelo HLA-DRB1*15:01, conocido por ser el principal factor genético de susceptibilidad a la EM, también ha sido investigado en relación con la respuesta terapéutica. En algunos estudios, su presencia se ha vinculado a una menor respuesta a interferón beta, aunque los resultados son aún inconsistentes entre distintas poblaciones (Link et al., 2014; Samadzadeh et al., 2015). La variante rs6897932 en *IL7R* (interleukin-7 receptor alpha) también ha mostrado asociación con la respuesta terapéutica a interferón beta y con la evolución clínica de la enfermedad, posiblemente debido a su influencia en la homeostasis de linfocitos T y en la inflamación del SNC (Gregory et al., 2007). Por último, se ha propuesto que variantes que modifican la expresión de CD58 podrían influir indirectamente en la eficacia con interferón beta, en este sentido, el SNP rs1335532 se correlaciona con mayores niveles de ARNm de CD58 en pacientes con EM (Mitkin et al., 2018), CD58 codifica una molécula que fortalece la adhesión y señalización entre células presentadoras de antígenos y linfocitos T a través de CD2, por lo que su mayor expresión podría modular la respuesta inmune inducida por interferón beta (Torbati, Karami, Ghaffarpour, & Zamani, 2015).

8.2 Polimorfismos en CYP2C9 y metabolismo de S1P-moduladores

El metabolismo de siponimod depende principalmente de la enzima hepática CYP2C9, codificada por el gen *CYP2C9*. Las variantes alélicas *CYP2C9* *2 y *3 reducen significativamente la actividad enzimática, lo que conlleva una disminución del aclaramiento del fármaco y una prolongación de su vida media, aumentando así el riesgo de efectos adversos. En consecuencia, la FDA exige realizar pruebas genéticas para determinar el genotipo del paciente antes de iniciar el tratamiento con siponimod. Los pacientes con genotipos *CYP2C9* *1/*3 o *2/*3 deben recibir una dosis reducida, mientras que aquellos con el genotipo *3/*3 tienen contraindicado el uso del fármaco. Sin embargo, a pesar de esta obligatoriedad, la genotipificación no está categorizada oficialmente como una "etiqueta farmacogenética" según el listado vigente de la FDA, ya que aparece bajo la sección de advertencias y precauciones del prospecto, y no en la tabla de biomarcadores farmacogenómicos en el etiquetado (FDA, 2024).

8.3 Polimorfismos en genes de adhesión e inmunorreceptores

Diversos polimorfismos han sido vinculados con una respuesta terapéutica inadecuada al natalizumab; entre ellos, destaca *GP6* (rs2304166), cuyo genotipo CC muestra una asociación estadísticamente significativa con una mala respuesta clínica (odds ratio: 22; $p = 10^{-8}$). Estos resultados evidencian una fuerte correlación entre dicho genotipo y la falta de eficacia del tratamiento (Al-Mojel, Alroughani, Kannankeril, Dashti, & Al-Temaimi, 2019). Por otro lado, el polimorfismo *ITGA4* (rs1143676) se ha vinculado a falla terapéutica, donde el genotipo AG se asocia a mayor riesgo de no respuesta (Ahmed, Ali, & Al-Gawwam, 2023). El SNP rs11132400, ubicado en el gen *LRP6*, influye en la respuesta a natalizumab a través de la modulación de la vía Wnt/ β -catenina, en la que también participa la proteína adaptadora GRB2 (Clarelli et al., 2024), por lo tanto, ambos podrían modular la respuesta a natalizumab. Finalmente, el polimorfismo rs1801274 presente en el gen *FCGR2A* (Fc gamma receptor IIA), provoca un cambio de histidina (H) por arginina (R) en la posición 131 (H131R), afectando la afinidad del receptor por la fracción Fc de los anticuerpos IgG. Se ha planteado que los individuos con genotipo GG (correspondiente al alelo R131) tienen menor capacidad de unión a IgG2, lo que podría influir en la eficacia de natalizumab, aunque la evidencia aún es limitada y no concluyente (de Matos et al., 2024)

8.4 Polimorfismos en TPMT y riesgo hematológico

Aunque la azatioprina no es un DMT de primera línea, su uso se ha documentado como terapia inmunosupresora alternativa en formas progresivas o en contextos específicos. El gen *TPMT* codifica una enzima que metaboliza tiopurinas, como la azatioprina, en este sentido, polimorfismos como *TPMT* *2, *3A y *3C reducen la actividad enzimática, provocando acumulación de metabolitos tóxicos (6-tioguanina), lo que incrementa el riesgo de mielotoxicidad grave. La FDA recomienda realizar pruebas genéticas para identificar variantes en *TPMT* antes de iniciar tratamiento con azatioprina (Relling et al., 2019).

8.5 Otros polimorfismos en investigación

Más allá de los polimorfismos con implicaciones clínicas ya bien establecidas, la investigación actual se enfoca en variantes genéticas en genes como *SIPRI*, *NRF2*, *TNFRSF1A*, *CLEC16A* y *ZC3HAV1*. Estas variantes son de particular interés debido a su posible influencia en cómo los pacientes responden a tratamientos clave como el fingolimod

y el dimetilfumarato. El gen *SIPRI* es crucial porque codifica el receptor blanco de fingolimod. Por lo tanto, cualquier variación en este gen podría modificar la afinidad o eficacia del fármaco (Chun, Giovannoni, & Hunter, 2021).

Por otro lado, Nrf2 es un factor clave en la regulación del estrés oxidativo, un mecanismo fundamental a través del cual actúa el dimetilfumarato. Se ha propuesto que el polimorfismo rs6721961 en la región promotora de *Nrf2* podría afectar la expresión génica y, en consecuencia, la eficacia del tratamiento (Hammer et al., 2018; Hashimoto, 2018). Del mismo modo, variantes en *TNFRSF1A*, gen involucrado en la señalización del TNF- α , y en *CLEC16A*, asociado a procesos autoinmunes y de autofagia, podrían desempeñar un papel modulador en la efectividad terapéutica. Finalmente, *ZC3HAV1*, un gen implicado en la respuesta inmune antiviral ha surgido como un candidato prometedor. Sin embargo, es importante destacar que la evidencia en torno a este gen es aún preliminar y no ha sido validada clínicamente (Hammer et al., 2018).

CONCLUSIONES

La tendencia actual para el tratamiento de EM es iniciar con fármacos de mayor eficacia en fases tempranas, para controlar la inflamación y reducir brotes de forma sostenida con la integración de fármacos inmunológicos, biotecnológicos y farmacogenéticos, antes que la neurodegeneración sea irreversible. Esta estrategia es respaldada por el hecho de que la EM constituye la segunda causa de discapacidad en adultos jóvenes. Sin embargo, la respuesta terapéutica es heterogénea; por ello, la personalización del tratamiento resulta indispensable. En este punto, la farmacogenética ya ofrece herramientas clínicas como genotipificar *CYP2C9* antes de suministrar siponimod, o identificar variantes en *ITGA4* que modulan la eficacia de natalizumab. Estos son ejemplos de cómo adecuar la elección y la dosificación para maximizar beneficios y minimizar riesgos. Hasta ahora, los avances indican que una estrategia multidisciplinaria basada en diagnóstico precoz, resonancia magnética seriada y pruebas genéticas selectivas será esencial para optimizar la farmacoterapia y ofrecer una mayor y mejor esperanza de vida a los pacientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmed, F. T., Ali, S. H., & Al-Gawwam, G. A. A. (2023). Integrin alpha-4 gene polymorphism in relation to natalizumab response in multiple sclerosis patients. *Neurology Asia*, 28(2), 349-358.
- Aktas, O., Küry, P., Kieseier, B., & Hartung, H.-P. (2010). Fingolimod is a potential novel therapy for multiple sclerosis. *Nature Reviews Neurology*, 6(7), 373-382.
- Al-Mojel, M., Alroughani, R., Kannankeril, T., Dashti, M., & Al-Temaimi, R. (2019). GP6 rs2304166 polymorphism is associated with response to natalizumab in multiple sclerosis patients. *Multiple Sclerosis and Demyelinating Disorders*, 4(1), 2. doi:10.1186/s40893-019-0039-0
- Bar-Or, A., Pachner, A., Menguy-Vacheron, F., Kaplan, J., & Wiendl, H. (2014). Teriflunomide and its mechanism of action in multiple sclerosis. *Drugs*, 74(6), 659-674. doi:10.1007/s40265-014-0212-x
- Berger, A. A., Sottosanti, E. R., Winnick, A., Izygon, J., Berardino, K., Cornett, E. M., . . . Urits, I. (2021). Monomethyl fumarate (MMF, Bafiertam) for the treatment of relapsing forms of multiple sclerosis (MS). *Neurology International*, 13(2), 207-223.
- Buzzard, K. A., Broadley, S. A., & Butzkueven, H. (2012). What do effective treatments for multiple sclerosis tell us about the molecular mechanisms involved in pathogenesis? *International journal of molecular sciences*, 13(10), 12665-12709.
- Carretero Ares, J. L., Bowakim Dib, W., & Acebes Rey, J. M. (2001). Actualización: esclerosis múltiple. *Medifam*, 11(9), 30-43.
- Chiba, K. (2020). Discovery of fingolimod based on the chemical modification of a natural product from the fungus, *Isaria sinclairii*. *The Journal of Antibiotics*, 73(10), 666-678.
- Chun, J., Giovannoni, G., & Hunter, S. F. (2021). Sphingosine 1-phosphate Receptor Modulator Therapy for Multiple Sclerosis: Differential Downstream Receptor Signalling and Clinical Profile Effects. *Drugs*, 81(2), 207-231. doi:10.1007/s40265-020-01431-8

- Chun, J., & Hartung, H. P. (2010). Mechanism of action of oral fingolimod (FTY720) in multiple sclerosis. *Clin Neuropharmacol*, 33(2), 91-101.
doi:10.1097/WNF.0b013e3181cbf825
- Clarelli, F., Corona, A., Pääkkönen, K., Sorosina, M., Zollo, A., Piehl, F., . . . Boneschi, F. G. M. (2024). Pharmacogenomics of clinical response to Natalizumab in multiple sclerosis: a genome-wide multi-centric association study. *J Neurol*, 271(11), 7250-7263. doi:10.1007/s00415-024-12608-6
- Cohan, S. L., Hendin, B. A., Reder, A. T., Smoot, K., Avila, R., Mendoza, J. P., & Weinstock-Guttman, B. (2021). Interferons and multiple sclerosis: Lessons from 25 years of clinical and real-world experience with intramuscular interferon beta-1a (Avonex). *CNS drugs*, 35(7), 743-767.
- Cohen, J. A., & Chun, J. (2011). Mechanisms of fingolimod's efficacy and adverse effects in multiple sclerosis. *Ann Neurol*, 69(5), 759-777. doi:10.1002/ana.22426
- Coles, A. J., Twyman, C. L., Arnold, D. L., Cohen, J. A., Confavreux, C., Fox, E. J., . . . Compston, D. A. (2012). Alemtuzumab for patients with relapsing multiple sclerosis after disease-modifying therapy: a randomised controlled phase 3 trial. *Lancet*, 380(9856), 1829-1839. doi:10.1016/s0140-6736(12)61768-1
- Confavreux, C., & Vukusic, S. (2008). The clinical epidemiology of multiple sclerosis. *Neuroimaging Clinics of North America*, 18(4), 589-622.
- Coyle, P. K. (2017). Pharmacogenetic Biomarkers to Predict Treatment Response in Multiple Sclerosis: Current and Future Perspectives. *Mult Scler Int*, 2017, 6198530. doi:10.1155/2017/6198530
- de Matos, M. D., Cardoso, R. C., Duarte, L. A., Guimenez, B. D., Pavani, G. K., Fernandez, K. A., . . . Alves-Leon, S. V. (2024). FCGR2A rs1801274 polymorphism is associated with response to natalizumab in multiple sclerosis patients. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 82(S 01), A059.
- Dwyer, C. M., Nguyen, L. T.-T., Healy, L. M., Dutta, R., Ludwin, S., Antel, J., . . . Kilpatrick, T. J. (2020). Multiple Sclerosis as a Syndrome—Implications for Future Management. *Frontiers in Neurology*, 11, 784.

- FDA. (2024). Table of Pharmacogenomic Biomarkers in Drug Labeling. Retrieved from <https://www.fda.gov/drugs/science-and-research-drugs/table-pharmacogenomic-biomarkers-drug-labeling>
- Fernández, O., Fernández, V. E., & Guerrero, M. (2015). Tratamiento de la esclerosis múltiple. *Medicine-Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, 11(77), 4622-4633.
- Gärtner, J., Hauser, S. L., Bar-Or, A., Montalban, X., Cohen, J. A., Cross, A. H., . . . Kappos, L. (2022). Efficacy and safety of ofatumumab in recently diagnosed, treatment-naïve patients with multiple sclerosis: Results from ASCLEPIOS I and II. *Mult Scler*, 28(10), 1562-1575. doi:10.1177/13524585221078825
- Godina, M. C. (2023). Teriflunomide. *Neurología, Neurocirugía y Psiquiatría*, 51(2), 70-71.
- Gold, R., Kappos, L., Arnold, D. L., Bar-Or, A., Giovannoni, G., Selmaj, K., . . . Dawson, K. T. (2012). Placebo-controlled phase 3 study of oral BG-12 for relapsing multiple sclerosis. *N Engl J Med*, 367(12), 1098-1107. doi:10.1056/NEJMoa1114287
- Gold, R., & Wolinsky, J. S. (2011). Pathophysiology of multiple sclerosis and the place of teriflunomide. *Acta neurologica Scandinavica*, 124(2), 75-84.
- Goodman, A. D., Anadani, N., & Gerwitz, L. (2019). Siponimod in the treatment of multiple sclerosis. *Expert opinion on investigational drugs*, 28(12), 1051-1057.
- Gregory, S. G., Schmidt, S., Seth, P., Oksenberg, J. R., Hart, J., Prokop, A., . . . Haines, J. L. (2007). Interleukin 7 receptor alpha chain (IL7R) shows allelic and functional association with multiple sclerosis. *Nat Genet*, 39(9), 1083-1091. doi:10.1038/ng2103
- Hammer, A., Waschbisch, A., Kuhbandner, K., Bayas, A., Lee, D. H., Duscha, A., . . . Linker, R. A. (2018). The NRF2 pathway as potential biomarker for dimethyl fumarate treatment in multiple sclerosis. *Ann Clin Transl Neurol*, 5(6), 668-676. doi:10.1002/acn3.553
- Hashimoto, K. (2018). Essential Role of Keap1-Nrf2 Signaling in Mood Disorders: Overview and Future Perspective. *Front Pharmacol*, 9, 1182. doi:10.3389/fphar.2018.01182

- Hauser, S. L., Bar-Or, A., Comi, G., Giovannoni, G., Hartung, H.-P., Hemmer, B., . . . Selmaj, K. (2017). Ocrelizumab versus interferon beta-1a in relapsing multiple sclerosis. *New England Journal of Medicine*, 376(3), 221-234.
- Hauser, S. L., & Cree, B. A. C. (2020). Treatment of Multiple Sclerosis: A Review. *Am J Med*, 133(12), 1380-1390.e1382. doi:10.1016/j.amjmed.2020.05.049
- Horga, A., Castelló, J., Río, J., Tintoré, M., Auger, C., Sastre-Garriga, J., . . . Nos, C. (2011). Estudio observacional sobre la efectividad y seguridad del natalizumab en el tratamiento de la esclerosis múltiple. *Rev Neurol*, 52, 321-330.
- Horga, A., & de la Parte, J. F. H. (2007). Natalizumab en el tratamiento de la esclerosis múltiple. *Revista de neurología*, 45(5), 293-303.
- Junker, A. (2011). Pathophysiology of translational regulation by microRNAs in multiple sclerosis. *FEBS Lett*, 585(23), 3738-3746. doi:10.1016/j.febslet.2011.03.052
- Khatri, B. O., Garland, J., Berger, J., Kramer, J., Sershon, L., Olapo, T., . . . Rehn, E. (2015). The effect of dimethyl fumarate (Tecfidera™) on lymphocyte counts: a potential contributor to progressive multifocal leukoencephalopathy risk. *Multiple sclerosis and related disorders*, 4(4), 377-379.
- Kieseier, B. C., Arnold, D. L., Balcer, L. J., Boyko, A. A., Pelletier, J., Liu, S., . . . Deykin, A. (2015). Peginterferon beta-1a in multiple sclerosis: 2-year results from ADVANCE. *Multiple Sclerosis Journal*, 21(8), 1025-1035.
- Krajnc, N., Bsteh, G., Berger, T., Mares, J., & Hartung, H. P. (2022). Monoclonal Antibodies in the Treatment of Relapsing Multiple Sclerosis: an Overview with Emphasis on Pregnancy, Vaccination, and Risk Management. *Neurotherapeutics*, 19(3), 753-773. doi:10.1007/s13311-022-01224-9
- Lamore Iii, R., Jacob, E., Jacob, S. C., & Hilas, O. (2010). Dalfampridine (Ampyra): An aid to walking in patients with multiple sclerosis. *Pharmacy and Therapeutics*, 35(12), 665.
- Link, J., Lundkvist Ryner, M., Fink, K., Hermanrud, C., Lima, I., Brynedal, B., . . . Fogdell-Hahn, A. (2014). Human leukocyte antigen genes and interferon beta preparations influence risk of developing neutralizing anti-drug antibodies in multiple sclerosis. *PLoS One*, 9(3), e90479. doi:10.1371/journal.pone.0090479

- Linker, R. A., Lee, D.-H., Ryan, S., van Dam, A. M., Conrad, R., Bista, P., . . . Gold, R. (2011). Fumaric acid esters exert neuroprotective effects in neuroinflammation via activation of the Nrf2 antioxidant pathway. *Brain : a journal of neurology*, 134(Pt 3), 678-692. doi:10.1093/brain/awq386
- McGinley, M. P., Goldschmidt, C. H., & Rae-Grant, A. D. (2021). Diagnosis and Treatment of Multiple Sclerosis: A Review. *Jama*, 325(8), 765-779. doi:10.1001/jama.2020.26858
- Mi, S., Miller, R. H., Lee, X., Scott, M. L., Shulag-Morskaya, S., Shao, Z., . . . Pepinsky, R. B. (2005). LINGO-1 negatively regulates myelination by oligodendrocytes. *Nat Neurosci*, 8(6), 745-751. doi:10.1038/nn1460
- Miguel Toquero, R. (2017). Esclerosis múltiple: estudio observacional de práctica clínica habitual con fármacos orales de primera línea: teriflunomida y dimetilfumarato.
- Mitkin, N. A., Muratova, A. M., Korneev, K. V., Pavshintsev, V. V., Rumyantsev, K. A., Vagida, M. S., . . . Kuprash, D. V. (2018). Protective C allele of the single-nucleotide polymorphism rs1335532 is associated with strong binding of Ascl2 transcription factor and elevated CD58 expression in B-cells. *Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis*, 1864(10), 3211-3220. doi:10.1016/j.bbadis.2018.07.008
- Moreno, R. D., Esponda, M. M., Echazarreta, N. L. R., Triano, R. O., & Morales, J. L. G. (2012). Esclerosis múltiple: revisión de la literatura médica. *Revista de la Facultad de Medicina UNAM*, 55(5), 26-35.
- Navarro, C. E., Ordóñez-Callamand, E., & Alzate, J. P. (2020). Disease modifying therapies in multiple sclerosis: cost-effectiveness systematic review. *Farmacia Hospitalaria*, 44(2), 68-76.
- Opazo, J. A., González, V. F., Delgadillo, M. G., Núñez-Franz, L., Garcia, C. M., & Rodríguez, P. J. (2025). Tendencia de la mortalidad por esclerosis múltiple según sexo: Chile 1997-2019. *Neurología*.
- Oubiña, M., Ciapponi, A., Pichón-Riviere, A., Augustovski, F., Martí, S. G., Alcaraz, A., . . . Rey-Ares, L. (2014). Teriflunomida para el tratamiento de la esclerosis múltiple.
- Piehl, F. (2021). Current and emerging disease-modulatory therapies and treatment targets for multiple sclerosis. *J Intern Med*, 289(6), 771-791. doi:10.1111/joim.13215

- Pournajaf, S., Dargahi, L., Javan, M., & Pourgholami, M. H. (2022). Molecular pharmacology and novel potential therapeutic applications of fingolimod. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 807639.
- Racke, M. K. (2009). Immunopathogenesis of multiple sclerosis. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 12(4), 215-220.
- Relling, M. V., Schwab, M., Whirl-Carrillo, M., Suarez-Kurtz, G., Pui, C. H., Stein, C. M., . . . Yang, J. J. (2019). Clinical Pharmacogenetics Implementation Consortium Guideline for Thiopurine Dosing Based on TPMT and NUDT15 Genotypes: 2018 Update. *Clin Pharmacol Ther*, 105(5), 1095-1105. doi:10.1002/cpt.1304
- Reuss, R. (2013). PEGylated interferon beta-1a in the treatment of multiple sclerosis—an update. *Biologics: Targets and Therapy*, 131-138.
- Río Izquierdo, J., & Montalban, X. (2009). Natalizumab en esclerosis múltiple. *Rev. neurol.(Ed. impr.)*, 265-269.
- Rousseau, F. S., Wang, L., Sprague, T. N., Lategan, T. W., & Berkovich, R. R. (2023). Comparative pharmacokinetics and bioavailability of monomethyl fumarate following a single oral dose of Bafiertam®(monomethyl fumarate) versus Vumerity®(diroximel fumarate). *Multiple sclerosis and related disorders*, 70, 104500.
- Rudick, R. A., Stuart, W. H., Calabresi, P. A., Confavreux, C., Galetta, S. L., Radue, E.-W., . . . Lynn, F. (2006). Natalizumab plus interferon beta-1a for relapsing multiple sclerosis. *New England Journal of Medicine*, 354(9), 911-923.
- Ryan, N. J. (2014). Ataluren: first global approval. *Drugs*, 74(14), 1709-1714.
- Samadzadeh, S., Tabibian, E., Sabokbar, T., Shakoory, A., Dehgolan, S. R., Armaki, S. A., . . . Abolfazli, R. (2015). HLA-DRB1 does not have a role in clinical response to interferon-beta among Iranian multiple sclerosis patients. *J Neurol Sci*, 352(1-2), 37-40. doi:10.1016/j.jns.2015.03.004
- Sandoval, J. L. R., López-Ruiz, M., Barroso-Rodríguez, N., Cantú-Brito, C., Violante-Villanueva, A., Hernández-Hernández, M., . . . Revilla-Beltri, J. (2013). Estudio de seguridad y farmacodinamia comparativa del efecto del acetato de glatiramer de prueba y de referencia (Probioglat® y Copaxone®) sobre respuesta Th1, Th2 y

- sVCAM en pacientes con esclerosis múltiple remitente-recurrente. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 14(6), 306-313.
- Schneider, R., & Oh, J. (2022). Bruton's Tyrosine Kinase Inhibition in Multiple Sclerosis. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 22(11), 721-734. doi:10.1007/s11910-022-01229-z
- Scott, L. J. (2020). Siponimod: a review in secondary progressive multiple sclerosis. *CNS drugs*, 34(11), 1191-1200.
- Torbati, S., Karami, F., Ghaffarpour, M., & Zamani, M. (2015). Association of CD58 Polymorphism with Multiple Sclerosis and Response to Interferon β Therapy in A Subset of Iranian Population. *Cell J*, 16(4), 506-513. doi:10.22074/cellj.2015.505
- Vargas Osses, J., Aracena Conte, L. R., Cepeda Zumaeta, S., Eloiza, C., Agurto Merino, P., Arteaga Pérez, P., . . . Nogales-Gaete, J. (2024). Plan de garantía s de atención y tratamiento para pacientes con esclerosis múltiple: Impacto en beneficiarios del sistema público de Chile 2008–2018. *Revista médica de Chile*, 152(7), 787-797.
- Wulff, H., Calabresi, P. A., Allie, R., Yun, S., Pennington, M., Beeton, C., & Chandy, K. G. (2003). The voltage-gated Kv1.3 K(+) channel in effector memory T cells as new target for MS. *J Clin Invest*, 111(11), 1703-1713. doi:10.1172/jci16921
- Yednock, T. A., Cannon, C., Fritz, L. C., Sanchez-Madrid, F., Steinman, L., & Karin, N. (1992). Prevention of experimental autoimmune encephalomyelitis by antibodies against alpha 4 beta 1 integrin. *Nature*, 356(6364), 63-66. doi:10.1038/356063a0

**EL USO DE CHATBOTS Y LA
SATISFACCIÓN DE CLIENTES
EN EMPRESAS FINANCIERAS
PERUANAS²⁸**

**THE USE OF CHATBOTS AND
CUSTOMER SATISFACTION IN
PERUVIAN FINANCIAL COMPANIES**

Flor Lavanda Reyes²⁹

Rosa Ruiz Reyes³⁰

Mario Reyes Mejía³¹

Luis Castillo Samanamud³²

Julia Reyes Ruiz³³

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.³⁴

141

²⁸ Derivado del proyecto de investigación: El uso de chatbots y la satisfacción de clientes en empresas financieras peruanas

²⁹Docente Principal. Facultad de Administración. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú.
flavanda@unica.edu.pe.

³⁰Docente Principal. Decana de la Facultad de Obstetricia. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú.
rosa.ruiz@unica.edu.pe

³¹Docente Principal. Director de la Escuela de Post Grado. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú.
gustavo.reyes@unica.edu.pe

³²Docente Principal. Facultad de Medicina Humana. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú.
luis.castillo@unica.edu.pe

³³Docente auxiliar. Facultad de Odontología. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú.
luzmila.reyes@unica.edu.pe

³⁴ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

Las empresas han innovado en los canales para atender a sus clientes, por lo que la utilización de medios digitales se ha incrementado notablemente en los últimos años, de tal manera que la experiencia del usuario sea satisfactoria. En esta investigación se planteó como objetivo general: determinar de qué manera el uso de chatbots influye en los niveles de satisfacción de los clientes en empresas financieras peruanas. Se empleó una metodología de tipo cuantitativa, de nivel descriptivo-explicativo y diseño no experimental del tipo relacional. La población conformada por los habitantes del Perú mayores de edad y la muestra obtenida mediante fórmula de 150 clientes, elegidos aleatoriamente de distintas ciudades a nivel nacional. El trabajo de campo permitió recolectar información aplicando una encuesta virtual, cuyo instrumento fue un cuestionario de catorce preguntas sobre las variables de estudio, al término de ello fueron analizadas a través de una revisión documental. Los resultados mostraron que los clientes se sienten motivados a utilizar este sistema, debido a que no tiene un horario de atención, cuentan con un tutorial, formulan diversos tipos de preguntas, y demuestra que estas entidades están a la vanguardia de las herramientas para mejorar la calidad de su servicio y la satisfacción de sus usuarios. Concluimos, que el uso de los chatbots origina niveles de satisfacción favorables en los clientes de empresas financieras peruanas.

PALABRAS CLAVE: Asistente virtual, Chatbot, clientes, empresas financieras, niveles de satisfacción.

ABSTRACT

The companies have innovated in the channels they use to serve their customers, and the use of digital media has increased significantly in recent years, ensuring a satisfactory user experience. The general objective of this research was to determine how the use of chatbots influences customer satisfaction levels in Peruvian financial companies. A quantitative, descriptive-explanatory methodology and a non-experimental, relational design were used. The population consisted of adults living in Peru, and the sample was obtained using a formula of 150 clients, randomly selected from different cities nationwide. The fieldwork allowed for the collection of information through a virtual survey, the instrument of which was a fourteen-question questionnaire on the study variables. These questions were then analyzed through a documentary review. The results showed that customers are motivated to use this system because it has no set business hours, offers a tutorial, and allows them to ask a variety of questions. This demonstrates that these organizations are at the forefront of tools to improve the quality of their service and customer satisfaction. We conclude that the use of chatbots leads to favorable levels of satisfaction among customers of Peruvian financial companies.

Keywords: Virtual assistant, chatbot, customers, financial companies, satisfaction levels.

INTRODUCCIÓN

El ámbito digital ha invadido todos los sectores económicos, los dispositivos móviles, así como diversas herramientas tecnológicas están cada vez al alcance de la mayoría, debido a que el futuro estará invadido por ellas. Por otro lado, la inteligencia artificial ha cambiado la manera como interactuamos y la importancia que se le daba a la tecnología, debido a que está ofreciendo una elevada productividad en las empresas y diversas alternativas para el ahorro de tiempo y dinero a los clientes.

Según Rodríguez (2022) esta conexión facilita tener un acceso a la información en el momento que ocurren los sucesos en el mundo, lo que permite una mejor gestión de las empresas, en relación a las actividades asistenciales con sus clientes, por lo que la tecnología puede ser aprovechada favorablemente. Zoltners et al (2021) manifiesta que la implementación de chatbot para mejorar el servicio de consultas y reclamos de los usuarios, permite una atención durante todo el día. Debido a su crecimiento y alta aceptación, se proyecta que para el 2030 los chatbot alcance los 27.300 millones de dólares a nivel mundial, ya que las pequeñas empresas también están analizando la posibilidad de utilizarlas. Botpress (2025)

En la Editorial Max (2023) encontramos que la definición de chatbot se ha diseñado como un programa informático, donde "chat" (conversación en línea) y "bot" (robot) se combinan, para simular conversaciones humanas a través de la inteligencia artificial. Se utiliza para la atención al cliente y plataformas digitales, para interactuar automáticamente y responder a las consultas de los usuarios, mejorando su experiencia, a través de mensajes, sitios web o redes sociales.

Pionce et al. (2022). Un chatbot funciona de manera muy similar a un asistente humano, cuando un cliente envía una consulta, generalmente en texto, el chatbot está programado para responder en función a rutas predefinidas o establecidas mediante aprendizaje automático, es decir, cuenta con reducidas habilidades y conocimientos, por lo que es importante considerar que el bot dará una respuesta precisa, cuando se formule una pregunta con instrucciones específicas. Se clasifican según el propósito que persiguen, por lo que encontramos usualmente tres gupos:

◆ Para tareas de marketing: los que ofrecen información detallada de los productos o servicios que se ofrecen en la empresa.

◆ Para soporte y atención al cliente: destinados a responder las preguntas frecuentes de los usuarios, así como brindar información concreta que ellos requieran, lo que permite personalizar el servicio.

◆ Para ventas o comercio electrónico: los que ofrecen precios, cantidades disponibles, variedad, de los productos o servicios de la empresa, para aumentar la satisfacción del cliente.

En el Perú, la inteligencia artificial se aplica en la industria bancaria y financiera, debido a que es el sector económico con mayor cantidad de reclamos de los clientes, esta transformación se presenta por la capacidad que tiene con el manejo de grandes cantidades de información, identificar tendencias y proyecciones, lo que facilita una efectiva toma de decisiones y disminución en los riesgos. Por otro lado, los problemas de fraude cibernético en los bancos han originado que los consumidores utilizan aplicativos que las mismas instituciones fomentan con sus números telefónicos o app para hacer las transacciones y tener un mayor acceso a los servicios financieros que les ofrecen.

Según Botpress (2025) en un estudio realizado para identificar la estadística del uso de chatbot en empresas peruanas, se ha identificado que el 96% de los clientes saben qué es un chatbot y 47% de ellos lo han confundido con un asistente real por la facilidad con que pueden utilizarlo. Dentro de las preferencias que expresaron fueron: 87,2% han tenido una experiencia favorable en su uso; 62% prefiere utilizar un chatbot que el personal de la organización; 71% considera más rápido consultar el estado de su trámite a través de este sistema y 69% está satisfecho.

En el caso del sector financiero, 70% de los usuarios han utilizado el chat de su institución en varias ocasiones, ya que puede resolver sus problemas con las cuentas, así como que les permite hacer transacciones entre entidades bancarias.

Según la Fundación Corresponsables (2024) encontramos diversos bancos utilizando el asistente virtual para atender a sus clientes, teniendo gran aceptación y éxito con ellos. El Banco de Crédito del Perú (BCP) ofrece a través de su banca por teléfono la ayuda de Clara,

la cual a través de la inteligencia artificial permite atender consultas de movimientos, últimos saldos, cambio de clave, realizar o activar compras por internet, así como el pase a cuotas de las compras realizadas con la tarjeta de crédito. Clara tiene como principal beneficio es interpretar el lenguaje humano como una conversación coloquial, por ello inicia con un saludo y expresar la voluntad de ayudar, por ello permite una respuesta cercana al requerimiento del cliente, en caso de mayor complejidad trasladar la llamada a un asistente personal, que con mayor experiencia podrá solucionar el problema; también debe resaltarse que ofrece más de veinte funcionalidades que tratan de solucionar la mayor cantidad de preguntas acerca de los problemas usuales de los usuarios.

Según el Banco Continental (BBVA, 2025) también a implementado un asistente virtual que ofrezca soluciones rápidas, efectivas y acorde con las expectativas de sus clientes, así como para competir de una mejor manera en el mercado peruano, que cada día introduce este sistema en instituciones financieras. Como muestra de su motivación constante de innovación y aprovechar los recursos tecnológicos, así como brindar una experiencia favorable de sus clientes en sus plataformas, creó en el 2021 el asistente virtual llamado BLUE, que ofrece una interfaz amigable y con comunicación sencilla ha llamado la atención de los consumidores.

Su principal objetivo es atender a sus clientes las veinticuatro horas del día, para orientarlos en las operaciones y transacciones que van a realizar en la App del banco y la banca por internet que ofrecen; desde esa fecha han atendido más de tres millones de consultas, de diversos tipos, teniendo satisfechos a más del millón de clientes con que cuenta a nivel nacional. Debido a la gran aceptación, en el 2024 se implementó Blue Voicebot, una nueva versión que permite a través de una llamada telefónica hacer preguntas específicas y resolverlos inmediatamente.

Por otro lado, BBVA (2024) la inteligencia artificial es aprovechada por el banco para ofrecer a sus clientes la garantía de que los fraudes a través de sus plataformas disminuyan, para ello envía alertas en el momento que realizan la transacción para que el usuario de su conformidad, en caso contrario la anulan, esto permite en tiempo real que se identifiquen las compras, pagos, etc. que pueden realizar otras personas; este servicio ha permitido disminuir en un 75% las transacciones fraudulentas.

Interbank también cuenta con un asistente virtual llamado AVI la cual de manera fácil puede brindar información de cómo saber la deuda que se tiene en la tarjeta de crédito, así como bloquearla en caso de robo o pérdida, hacer seguimiento a su reclamo, entre otros servicios.

El portal Gob.pe (2024) resalta que el banco más grande del país, que tiene sucursales en todas las ciudades, llamado Banco de la Nación, cuenta con Quina, la asesora virtual que atiende en español y en quechua, idiomas oficiales del país. El quechua es hablado por la mayoría de la población de la sierra, es decir, se cuenta con una gran cantidad de clientes quechuahablantes, que podrán ser atendidos y orientados para que realicen sus operaciones bancarias, consultas sobre saldos, transacciones entre bancos, etc.

El Banco de la Nación (BN) presentó a Quina, la primera asesora virtual informativa de un banco en el Perú que atiende en español y en quechua. A través de Quina, los clientes y usuarios del banco podrán solicitar información sobre productos y servicios, recibir orientación para realizar operaciones bancarias, acceder a educación financiera y resolver una amplia gama de consultas.

Quina también orienta sobre cómo efectuar transferencias desde el celular, evaluaciones de crédito, productos y seguros, ubicación de las agencias, información sobre canales para ingresar reclamos, requerimientos y quejas.

Según Rodríguez, D. et al (2023) desde la pandemia, se realizaron diversas estrategias para que las empresas ofrecieran un mejor servicio, lo que significaba la diferencia entre comprar o no, es decir, el tiempo y la modalidad de entrega, la plataforma de venta, etc. determinaron la satisfacción de los clientes. Este proceso ha continuado debido a que la tecnología permitió utilizar diversos tipos de instrumentos que permitieron cubrir las expectativas de los consumidores.

Bernal, et al (2020) explica que la satisfacción del cliente está vinculada con las emociones que éste experimenta con el producto, precio, servicio, local, al momento de la compra, según las expectativas que tenía. Es considerado un valor subjetivo, por lo que varía de persona a persona, es decir, una podrá decir que está satisfecha porque su experiencia fue favorable, pero para otra lo fue desfavorable. Milind & Jagdich (1997) expone que hay variables que la empresa puede mejorar para que los clientes sientan una mayor satisfacción,

las cuales son: el producto, su presentación, envase, precio, puede influir a la hora de decidir la compra; las actividades comerciales tales como horario de atención, cantidad de personal disponible para pagar, hace que un cliente prefiera un establecimiento; el servicio post venta, ofrecer instalación gratuita, mantenimiento permanente, es importante para los compradores y la cultura de la empresa, por ejemplo: enviar información de nuevos modelos del producto, enviar un saludo de cumpleaños o contar con una base de datos de sus clientes.

Treviño, R. & Treviño, E. (2021) expuso que la satisfacción de los clientes es el resultado del efecto que causa la calidad del servicio recibido; es por ello, que, al responder a sus necesidades, cubrir y superar sus expectativas, podremos conseguir clientes leales. Hoy en día las empresas compiten por cada usuario, debido a la gran competencia del mercado, porque un cliente satisfecho seguirá comprando y recomendando la marca. Gómez, et al (2020) agrega que indicador del nivel de satisfacción es la cantidad y frecuencia de consumo hacia un producto o servicio, por lo que encontramos personas que todas sus cuentas están en un solo banco, o comprar todos los productos de una misma marca.

Según Steffanell et al (2016) la lealtad de un cliente se identifica a través de un gran deseo de adquirir el producto o servicio, cuya frecuencia se incrementa cada vez más, porque lo utiliza en diversos escenarios lo que origina experiencias diferentes, por ejemplo: consumir una cerveza puede significar celebrar un ascenso, saciar la sed, etc. Garmendia (2019) promueve que es la mejor estrategia para ofrecer un valor agregado que fácilmente pueden identificar y diferenciar entre empresas. Así mismo, Vallejos, et al (2021) expresó que la confianza promueve relaciones duraderas entre clientes y empresas; en el caso de las entidades financieras, los clientes pueden sentirse seguros con su sectorista, por lo que se comunica rápidamente con él o soluciona sus problemas de manera eficiente.

Erazo & Narváez (2020) propuso que las empresas deben mantener satisfechos a sus clientes para que se vuelvan leales, es decir, los que vuelven una y otra vez por el producto o servicio recibido, pero también es importante mantener una relación cercana con ellas hasta lograr su fidelización, debido a que un cliente fiel recomienda el producto o servicio, sugiere lugares, comparte experiencias favorables, lo que logra una cadena de consumidores que quieren tener las mismas emociones.

MATERIAL Y METODO

La presente investigación fue desarrollada entre marzo y julio 2025, de tipo cuantitativo, de nivel descriptivo - explicativo y diseño no experimental, de tipo relacional. Participaron en el trabajo de campo ciento cincuenta clientes de empresas financieras peruanas, se realizó con una muestra aleatoria a nivel nacional que se obtuvo del muestreo probabilístico estratificado, según el autor Hernández, R, Fernández, C. y Baptista, L. (2014).

Se emplearon las técnicas de investigación análisis documental de las variables de estudio, artículos nacionales e internacionales, así como investigaciones de pre y post grado. Por otro lado, se aplicó una encuesta con su respectivo instrumento ficha de contenido y cuestionario, que contenía catorce interrogantes sobre las variables, se utilizaron para un mejor entendimiento de tipo abierto, cerrado, opción múltiple, entre otras. Para el procesamiento y clasificación de la información. se diseñaron tablas, cuadros y representaciones estadísticas de los datos que fueron analizados e interpretados con métodos estadísticos para la formulación de las conclusiones y recomendaciones del estudio.

149

RESULTADOS

TABLA 1

El diseño y funcionamiento del chatbot es el adecuado.

		Frecuencia	Porcentaje
Válido	Siempre	70	46
	Casi siempre	58	39
	A veces	22	15
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

La tabla muestra que 46% de clientes opina que el diseño y funcionamiento del chatbots de la financiera que visita es adecuado, por lo que su uso le parece fácil; 39% casi siempre

porque encuentra respuestas a sus consultas con mayor detalle. El 15% a veces es el adecuado por las opciones que ofrecen al contestar, porque la cantidad de llamadas y transacciones por este medio se incrementa cada día, por lo que sugiere una mayor cantidad de alternativas.

TABLA 2

Recibe un saludo de bienvenida al ingresar.

		Frecuencia	Porcentaje
Válido	Siempre	80	53
	Casi siempre	40	27
	A veces	30	20
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

El 53% respondió que siempre recibe un saludo de bienvenida cuando utiliza el asistente virtual de su entidad financiera, lo que le resulta amable y cortés; 27% casi siempre son cordiales, atentos, etc. en el sistema virtual por lo que prefiere utilizarlo y el 20% a veces inicia la conversación con un saludo, porque dan una presentación del banco y los servicios que ofrecen.

150

TABLA 3

Considera que puede formular todas las preguntas que requiera.

		Frecuencia	Porcentaje
Válido	Siempre	64	43
	Casi siempre	46	31
	A veces	30	20
	Casi nunca	10	6
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

Se expone que 43% siempre puede formular todas las preguntas que requiere, lo que da confianza y seguridad; 31% casi siempre encuentra respuestas a todas sus dudas, por la

cantidad de opciones que ofrecen y las preguntas frecuentes que hacen; 20% considera que a veces termina satisfecha con las respuestas que recibe, ya que no hay límite para plantearlas; por último, el 6% casi nunca le resulta favorable, debido a que prefiere una persona con la cual conversar sus problemas específicos.

TABLA 4

Le otorgan una rápida respuesta a las preguntas que formula.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	55	37
	Casi siempre	40	27
	A veces	35	23
	Casi nunca	20	13
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

La tabla estadística nos muestra que el 37% siempre recibe una rápida respuesta a las preguntas que formula cuando utiliza el asistente virtual; 27% expresó que casi siempre, debido a que hay horas en que tiene una mayor saturación las líneas telefónicas de las entidades financieras. De la misma manera, el 23 % a veces pierde mucho tiempo esperando ser atendida, lo que incomoda a los clientes. Por último, el 13% opinó que casi nunca la atienden de manera rápida, por lo que prefiere la atención de un asistente presencial en las oficinas de los bancos.

TABLA 5

Explican claramente cada uno de los productos financieros que ofrecen

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	69	46
	Casi siempre	71	47
	A veces	10	7
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

Encontramos que el 47% casi siempre explican claramente los productos financieros que ofrecen, lo que permite hacer comparaciones con otras entidades; 46% siempre debido a ello puede elegir las mejores opciones según sus requerimientos y el 7% considera a veces clara la información recibida, por lo que prefiere ir a las instalaciones de la entidad financiera.

TABLA 6

Ha realizado preguntas sobre productos específicos que quisiera obtener

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	60	40
	Casi siempre	50	33
	A veces	40	27
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

Los clientes requieren información sobre productos financieros específicos, por lo que el 40% siempre encuentra las respuestas a sus consultas, lo que ahorra tiempo en su horario de actividades; 33% considera casi siempre hacer consultas según sus requerimientos, porque en algunos casos ha requerido cambiar su fecha de pago, un monto mayor al establecido de manera mensual, etc. y 27% a podido hacer preguntas de situaciones específicas porque solamente hay opciones para elegir.

TABLA 7

Ofrece un tutorial para que ud pueda realizar de manera virtual transacciones entre sus cuentas.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	78	52
	Casi siempre	72	48
	A veces	0	0
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

Las entidades financieras son las que mejor servicio digital ofrecen en el país, por lo que el 52% siempre encuentra un tutorial en sus bancos para realizar transacciones virtuales entre sus cuentas, lo que facilita hacer depósitos, retiros, consultas de saldo, etc. y el 48 % casi siempre, utiliza el tutorial que ofrece su entidad financiera debido a que le ahorra tiempo y dinero, porque lo hace desde cualquier lugar y horario.

TABLA 8

Cuenta con un tutorial para que ud pueda realizar transacciones entre cuentas de diferentes bancos.

		Frecuencia	Porcentaje
Válido	Siempre	80	53
	Casi siempre	70	47
	A veces	0	0
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
Total		150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

El 53% de los clientes expresaron siempre contar con un tutorial para realizar transacciones entre diferentes bancos, lo cual facilita hacerlo de manera inmediata cuando se requiere y el 47 % considera casi siempre un beneficio tener un tutorial que pueda explicar para tener mejores resultados con las operaciones bancarias que realiza diariamente con otras instituciones financieras.

TABLA 9

Considera usted que este servicio digital es mejor que el ofrecido por el personal de la institución financiera.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	47	31
	Casi siempre	40	27
	A veces	33	22
	Casi nunca	30	20
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

El 31% considera siempre que el servicio digital que ofrecen los bancos es mejor que el brindado por el personal de manera directa, ya que pueden hacerlo desde cualquier lugar; 27% casi siempre es dinámico y adecuado, así como los nombres que colocan a los asistentes. Por otro lado, 22% a veces es considerado mejor, pero cuando se requiere una consulta específica es mejor hacerlo con un trabajador del banco. Por último, el 20% casi nunca lo considera mejor, ya que prefiere conversar con su sectorista, hacerle consultas y pedir su opinión.

154

TABLA 10

En promedio usted ingresa a este sistema una o más veces al día para sus transacciones.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	10	7
	Casi siempre	30	20
	A veces	50	33
	Casi nunca	34	23
	Nunca	26	17
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

La tabla muestra que, el 33% de los clientes a veces ingresa una o más veces al día, para utilizar al asistente virtual, lo que consideramos es favorable debido a que saben aprovechar los medios digitales a su disposición; 23% casi nunca debido a que desconfía de las transacciones virtuales, por todos los robos digitales que realizan los ciberdelincuentes. El 20% casi siempre ingresa una o más veces al asistente virtual, debido a que encuentra información valiosa sobre la situación financiera del país, tipo de cambio, etc.; 17% nunca debido a que prefiere identificar al empleado que le informa sobre sus cuentas y por último, solamente el 7% siempre lo utiliza una o más veces al día, debido a que considera un gran beneficio para los clientes.

TABLA 11

En promedio usted ingresa a este sistema una o más veces cada quince días para realizar diversas transacciones.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	50	33
	Casi siempre	70	47
	A veces	30	20
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

El 47% de los clientes casi siempre utiliza el chatbots de su entidad financiera una o más veces cada quince días, debió a que se considera satisfecho con el servicio que ofrece; 33% siempre ingresa para realizar diversas transacciones, así como responder las encuestas que hacen, porque eso permite mejorar; por último, el 20% a veces, debido a que utiliza las apps de las entidades financieras para realizar sus pagos de servicios, consulta de saldos, etc.

TABLA 12

Considera usted que se siente motivado a utilizar este sistema por la atención que recibe.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	90	60
	Casi siempre	40	27
	A veces	20	13
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

El 60% de los encuestados siempre está motivado a utilizar el sistema digital que utiliza su entidad financiera, por lo que la utiliza con gran frecuencia por la calidad del servicio que brinda; 27% casi siempre está motivado por el asistente virtual, ya que encuentra respuestas a sus preguntas y el 13% a veces se siente motivado con este sistema, debido a que le parece rápido y seguro, así como que la mayoría de las entidades lo utiliza.

156

TABLA 13

El nivel de satisfacción que tiene para su institución financiera es alto.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	65	43
	Casi siempre	60	40
	A veces	25	17
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

Encontramos que 43% de los clientes, siempre expresa un nivel de satisfacción alto por el servicio de chatbots que utiliza su entidad financiera, porque es rápido, tiene muchas

alternativas para las preguntas que se formulan y aceptan sugerencias. El 40% casi siempre debido a que el tiempo de espera es mucho en algunas ocasiones, te dejan con música o timbre de espera, lo que incomoda a la mayoría. Por último, el 17% a veces debido a que prefiere una reunión presencial donde el asistente responda con mayor detalle sus consultas.

TABLA 14

Promueve usted que las entidades utilicen estos sistemas para mejorar la calidad de su servicio.

		<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Válido	Siempre	80	53
	Casi siempre	70	47
	A veces	0	0
	Casi nunca	0	0
	Nunca	0	0
	Total	150	100

Fuente: Elaboración de los autores, mayo 2025

El 53% siempre promueve que las entidades financieras utilicen el sistema chatbots, debido a que les permite brindar un mejor servicio para los clientes, ya que ofrece beneficios como ahorro de tiempo, dinero y funciona las 24 horas del día; y el 47% casi siempre lo promueve, y que hace a nivel mundial es el sistema más utilizado para estar en contacto continuo con los clientes, los cuales hacen transacciones con mucha frecuencia.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

La inteligencia artificial está llegando cada vez a más usuarios, los cuales buscan un servicio de mejor calidad y que las empresas, fomenten una experiencia favorable cuando acuden a ellas. Implementar los chatbots en las entidades financieras es más frecuente, debido a que la innovación ofrece una atención más personalizada, con ahorro de tiempos en las respuestas y una mayor satisfacción en los consumidores debido a que desde cualquier lugar pueden encontrar soluciones virtuales a sus consultas.

Según Eeuwen, M. V. (2017) chatbot es un programa de software, que permite una comunicación con los clientes, a través del chat como una conversación amena entre dos individuos, pero que tiene un trasfondo comercial. Su funcionamiento permite que vayan mejorando con el pasar del tiempo, uno basado en reglas, ofrece respuestas que están en una base de datos, considerando las más frecuentes o de mayor interés, y el otro por máquinas inteligentes, son las que proporcionan información en base a consultas específicas del cliente. Dominika Kaczorowska-Spycharlska (2019) agrega que sus competencias comunicativas se incrementan permitiendo personalizar los mensajes, hacerlos más amenos y la comunicación directa, originando reacciones favorables en los oyentes.

La principal molestia de los clientes es que deban acudir de manera presencial a la entidad financiera, hacer colas y esperar varios minutos, para que los atienda un asesor o sectorista, por lo que empezaron a ofrecer las líneas telefónicas para disminuir estos tiempos; sin embargo, la tecnología ofrece en el sector otra alternativa, que permite mantener una conversación amena con un asistente virtual que no tiene horario de atención.

Considerando que los bancos ofrecen en su mayoría los mismos productos, opina Rostami, Khani y Soltani, (2016), la diferencia en la competencia la determina la calidad del servicio que ofrecen, la utilización de los chatbots puede marcar esta diferencia en la satisfacción de los clientes, los cuales cada vez utilizan las plataformas digitales en la mayoría de sus actividades diariamente. Trivedi, J. (2019). Concluimos, que el uso de los chatbots origina niveles de satisfacción favorables en los clientes de empresas financieras peruanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bernal, V., Matovelle, M., Ordoñez, C., & Ordoñez, M. (2020). Gestión de calidad del capital humano en la Universidad Católica de Cuenca [Quality management of human capital at the Catholic University of Cuenca]. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 5(3), 125-162. <http://dx.doi.org/10.35381/r.k.v5i3.892>
- Botpress (2025). Estadísticas clave de chatbot para 2025: Percepciones, crecimiento, del mercado y tendencias. Consultado en: <https://botpress.com/es/blog/key-chatbot-statistics>
- BBVA (2025). 'Blue', el asistente virtual de BBVA atiende más de cuatro millones de consultas en Perú. <https://www.bbva.com/es/pe/innovacion/blue-el-asistente-virtual-de-bbva-atiende-mas-de-cuatro-millones-de-consultas-en-peru/>
- BBVA. (2024). Qué algoritmos de inteligencia artificial utiliza BBVA para impulsar las finanzas de sus clientes. BBVA. <https://www.bbva.com/es/innovacion/que-algoritmos-de-inteligencia-artificial-utiliza-bbva-para-impulsar-las-finanzas-de-sus-clientes/>
- Editorial, M. (2023). Chatbots - Cómo saber todo. [Libro electrónico]. Bibliomundi
- Euwen, M. V. (2017). Mobile conversational commerce: messenger chatbots as the next interface between businesses and consumers (Master's thesis, University of Twente).
- Erazo, J. C., & Narváez, C. I. (2020). La gestión del capital intelectual y su impacto en la efectividad organizacional de la industria de cuero y calzado en la Provincia de Tungurahua - Ecuador [The management of intellectual capital and its impact on the organizational effectiveness of the leather and footwear industry in the Province of Tungurahua - Ecuador]. *Revista Espacios*, 41(21), 254-271.
- Fundación Corresponsables (2024). BCP: La Inteligencia Artificial llegó a la banca peruana para facilitar la atención a clientes. <https://www.corresponsables.com/per/actualidad/social/bcp-la-inteligencia-artificial-llego-a-la-banca-peruana-para-facilitar-la-atencion-a-clientes/>
- Garmendía, J. C. (2019). Satisfacción y lealtad del cliente en las operaciones domésticas de las aerolíneas colombianas. *Foro Empresarial*, 24 (1). <https://doi.org/10.33801/fe.v24i1.17231>
- Gob.pe (2024). Noticia Quina, primera asesora virtual de un banco en el Perú que atiende también en quecha. Consultado en:

<https://www.gob.pe/institucion/bn/noticias/920857-quina-primera-asesora-virtual-de-un-banco-en-el-peru-que-atiende-tambien-en-quechua>

- Gómez, S., Monsalve, V., Giraldo, A., Parra, P., & Miranda, R. (2020). Evaluación del grado de satisfacción personal en estudiantes de Medicina de la Universidad El Bosque. *Salud Bosque*. 10(1999), 1-15. <https://doi.org/10.18270/rsb.v10i2.2829>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L., (2014). *Metodología de la Investigación*. México DF: Editorial Mc Graw – Hill
- Milind, L., & Jagdich, S. (1997). *El cliente es la clave: cómo lograr una ventaja insuperable mediante la satisfacción del cliente [The customer is the key: how to achieve an unbeatable advantage through customer satisfaction]*. España: Díaz de Santos.
- Pionce, A., et al. (2022). Chatbots para ventas y atención al cliente. [Revista Unesum Ciencia]. Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Revista SUMMA (2025). Artículo Los mejores Chatbots de inteligencia artificial para utilizar en el año 2025. Consultado en: <https://revistasumma.com/los-mejores-chatbots-de-ia-para-usar-en-2025/>
- Rodríguez Armijos, Dany Yacely, Arista Huamán., Ana María, & Cruz-Tarrillo, José Joel. (2023). Calidad de servicio y su efecto en la satisfacción y lealtad de los clientes. *Revista San Gregorio*, 1(55), 65-77. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i55.2326>
- Rodríguez, P. (2022). *Inteligencia Artificial: Cómo Cambiará El Mundo (Y Tu Vida) [Libro Físico]*. <https://www.buscalibre.pe/libro-inteligencia-artificial-como-cambiara-elmundo-y-tu-vida/9786075691961/p/53985442>
- Rostami, A., Khani, A. H. A., & Soltani, G. (2016). The impact of e-service quality on the improvement of the level of communication with customers of bank Melli branches in south Tehran affairs office. *Procedia Economics and Finance*, 36, 448-455.
- Steffanell, I., Arteta, Y., & Noda, M. (2016). Gestión de lealtad del cliente de turismo de negocios en pymes hoteleras. *Ingeniería Industrial*, 37(3), 244-252. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=360448031003>
- Treviño, R., & Treviño, E. (2021). Análisis entre imagen de la tienda y satisfacción del cliente en tiendas minoristas transnacionales en el sector autoservicio. *Estudios Gerenciales*, 37(161), 556-565. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2021.161.4293>
- Trivedi, J. (2019). Examining the Customer Experience of Using Banking Chatbots and Its Impact on Brand Love: The Moderating Role of Perceived Risk. *Journal of Internet Commerce*, 1-21.

Vallejo, A. P., Cavazos, J., Lagunez, M. A., & Vásquez, S. E. (2021). Experiencia del cliente, confianza y lealtad de los millennials en el sector bancario de la ciudad de Cuenca-Ecuador. *Retos*, 11(22), 287-300. <https://doi.org/10.17163/ret.n22.2021.06>

Zoltners, A., et al. (2021). Perspectivas prácticas para el éxito de la digitalización de la fuerza de ventas. <https://doi.org/10.1080/08853134.2021.1908144>

**CULÉN (*OTHOLOBIUM GLANDULOSUM*)
UNA PLANTA MEDICINAL MAPUCHE
CON AMPLIAS PROPIEDADES
TERAPÉUTICAS³⁵**

**CULÉN (*OTHOLOBIUM GLANDULOSUM*) A
MAPUCHE MEDICINAL PLANT WITH
EXTENSIVE THERAPEUTIC PROPERTIES**

162

Cristian Paz³⁶

Muhammad Javid Iqbal³⁷

Revisores pares: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES³⁸

³⁵Derivado del proyecto de investigación: Cúlen (*Otholobium glandulosum*) una planta medicinal mapuche con amplias propiedades terapéuticas

³⁶ Natural Products & Drug Discovery, Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Medicina, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, Chile, correo electrónico: cristian.paz@ufrontera.cl (C.P.)

³⁷ m.iqbal@ufromail.cl (M.J.I.)

³⁸ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

Otholobium glandulosum (L.) JW Grimes es una especie endémica de Chile, perteneciente a la familia Fabaceae y presenta una significativa importancia farmacológica. Este capítulo presenta información sobre la caracterización fitoquímica detallada de la planta, la cual revela una rica gama de meroterpenoides bioactivos, furocumarinas y compuestos volátiles responsables de su eficacia terapéutica. El bakuchiol emerge como el constituyente bioactivo predominante, comprendiendo el 85,42% del aceite esencial y el 64,0% de los exudados resinosos, junto con derivados estructuralmente relacionados, incluyendo 3-hidroxibakuchiol, ciclobakuchiol A y B, y el novedoso diterpeno kuchiol. La evaluación farmacológica sistemática demuestra mecanismos terapéuticos multifacéticos que abarcan actividades antidiabéticas, antimicrobianas, antioxidantes, anticancerígenas y antiinflamatorias que validan las aplicaciones medicinales tradicionales. El análisis de relación estructura-actividad dilucida para sus compuestos bioactivos, así como las modificaciones químicas influyen en la actividad biológica, donde la hidroxilación mejora la capacidad antioxidante, la capacidad de ciclización y los efectos antiinflamatorios. La exitosa traslación del bakuchiol, de ser un componente bioactivo de la medicina tradicional a su uso clínico en aplicaciones dermatológicas, ejemplifica el desarrollo racional de fármacos a partir de fuentes naturales. Estudios mecanísticos revelan diversas dianas moleculares, como la modulación del citocromo P450, la inhibición del quórum-sensing y la activación de vías neuroprotectora, lo que amplía las aplicaciones terapéuticas más allá de los usos tradicionales. Este exhaustivo análisis químico medicinal posiciona a *O. glandulosum* como una valiosa fuente de compuestos terapéuticamente relevantes, a la vez que proporciona información para el desarrollo futuro de fármacos basados en el conocimiento de la medicina tradicional.

PALABRAS CLAVE: *Otholobium glandulosum*; química medicinal; bakuchiol; meroterpenoides; fitoquímica; actividades farmacológicas; relaciones estructura-actividad; medicina tradicional.

ABSTRACT

Otholobium glandulosum (L.) J.W. Grimes is an endemic species of Chile, belongs to the Fabaceae with family and represent a significant pharmacological importance. This chapter presents comprehensive medicinal chemistry and therapeutic insights into investigation encompasses detailed phytochemical characterization revealing a rich array of bioactive meroterpenoids, furocoumarins, and volatile compounds responsible for the plant's therapeutic efficacy. Bakuchiol emerges as the predominant bioactive constituent, comprising 85.42% of essential oil and 64.0% of resinous exudates, alongside structurally related derivatives including 3-hydroxybakuchiol, cyclobakuchiol A and B, and the novel diterpene kuchiol. Systematic pharmacological evaluation demonstrates multifaceted therapeutic mechanisms encompassing antidiabetic, antimicrobial, antioxidant, anticancer, and anti-inflammatory activities that validate traditional medicinal applications while revealing additional therapeutic potential. Structure-activity relationship analysis elucidates how chemical modifications influence biological activity, with hydroxylation enhancing antioxidant capacity and cyclization improving anti-inflammatory effects. The successful clinical translation of bakuchiol from traditional remedy to evidence-based dermatological applications exemplifies rational drug development from natural sources. Mechanistic studies reveal diverse molecular targets including cytochrome P450 modulation, quorum-sensing inhibition, and neuroprotective pathway activation, expanding therapeutic applications beyond traditional uses. This comprehensive medicinal chemistry analysis positions *O. glandulosum* as a valuable source of therapeutically relevant compounds while providing insights into future drug development based on traditional medicinal knowledge.

Keywords: *Otholobium glandulosum*; medicinal chemistry; bakuchiol; meroterpenoids; phytochemistry; pharmacological activities; structure-activity relationships; traditional medicine.

INTRODUCCIÓN

Otholobium glandulosum (L.) JW Grimes, comúnmente conocida como "Culén" es una de las plantas medicinales con mayor validación farmacológica de Sudamérica (A. Madrid & Silva, 2024). Este arbusto caducifolio, que alcanza alturas de hasta 6 metros, se distingue por sus característicos tricomas glandulares que producen exudados resinosos protectores que cubren la superficie de hojas y tallos. La especie representa el único miembro endémico de Chile de la familia Fabaceae, lo que la hace botánicamente significativa dentro del contexto de la flora chilena y globalmente importante por sus componentes químicos únicos y aplicaciones terapéuticas. El nombre vernáculo de la planta "Culén" deriva de las tradiciones lingüísticas mapuche, lo que refleja su profunda integración en la cultura indígena chilena, mientras que los colonizadores españoles se referían a esta especie como el "té indígena de Chile" debido a su amplio consumo como bebida refrescante y preparación medicinal (Montenegro et al., 2024).

La importancia de *O. glandulosum* en la atención médica chilena moderna se evidencia en su reconocimiento oficial en el compendio de "Medicinas Herbarias Tradicionales" de Chile, otorgado por el Ministerio de Salud, lo que reconoce su valor terapéutico e importancia cultural (Sartori & Prakofjewa, 2024). Este reconocimiento oficial valida siglos de uso tradicional y proporciona un marco para el desarrollo terapéutico continuo. La planta posee una importante importancia etnofarmacológica, con un uso documentado por el pueblo indígena mapuche para el tratamiento de trastornos digestivos, diabetes, afecciones inflamatorias y cicatrización de heridas. Sus preparaciones tradicionales suelen incluir extractos acuosos o decocciones para tratar trastornos metabólicos y dolencias gastrointestinales.

1. Características botánicas y distribución geográfica

1.1 Clasificación taxonómica

La historia taxonómica de esta especie refleja la evolución de la comprensión de la sistemática y la filogenética molecular de las Fabaceae. Originalmente descrita por Linneo como *Psoralea glandulosa* L., la especie se reclasifica en 1990 cuando J. W. Grimes la transfirió al género *Otholobium* basándose en estudios filogenéticos moleculares exhaustivos

de las relaciones con las Fabaceae (Egan et al., 2025). Esta reclasificación, si bien científicamente precisa, ha generado cierta confusión en la literatura terapéutica, ya que muchos estudios farmacológicos continúan haciendo referencia a la nomenclatura histórica. La clasificación taxonómica completa con la especie *O. glandulosum*, con *Psoralea glandulosa* L. como el sinónimo principal referenciado en la literatura médica, se resume en **la tabla 1**.

Tabla 1. Clasificación taxonómica de *Otholobium glandulosum*.

Reino	Plantas
Filo	Traqueofitas
Clase	Magnoliopsida
Orden	Fabales
Familia	Fabáceas
Tribu	Psoraleas
Género	Otholobium
Especies	Glandulosum

Morfológicamente, *O. glandulosum* se presenta como un arbusto robusto con corteza rayada de color marrón oscuro y ramas delgadas y erectas. Las hojas tienen un olor agradable, son pecioladas y están compuestas de folíolos lanceolados con superficies glandulares puntiagudas. Los distintivos tricomas glandulares que cubren las superficies de las hojas y los tallos representan una adaptación única, produciendo exudados resinosos que cumplen múltiples funciones ecológicas, incluyendo la disuasión de herbívoros, la resistencia a patógenos y la conservación del agua (A. Madrid & Silva, 2024). Estas mismas estructuras glandulares son responsables de los compuestos terapéuticos de la planta, lo que las hace centrales tanto para la adaptación ecológica como para las aplicaciones medicinales. La floración ocurre a finales de la primavera, produciendo racimos alargados de 10-15 cm de longitud con corolas de color azul pálido y bases blanquecinas, mientras que el fruto se desarrolla como una legumbre seca, monocarpelar de 6-7 mm de longitud, que contiene una sola semilla típica de la familia Fabaceae.

1.2. Distribución geográfica y hábitat

Otholobium glandulosum demuestra una distribución endémica notablemente restringida dentro de Chile, que abarca desde la Región de Coquimbo en el norte hasta la Región de Los Ríos en el sur (mostrado en la Figura 1). La especie ocupa un impresionante gradiente altitudinal de 25 metros sobre el nivel del mar en zonas costeras a 1.500 metros en regiones montañosas, lo que refleja su adaptación a diversas condiciones climáticas dentro de las zonas climáticas mediterráneas de Chile (A. Madrid & Silva, 2024). La preferencia de hábitat natural incluye valles húmedos y sistemas de quebradas con abundante exposición al sol, particularmente áreas con fuentes de agua confiables como estuarios y ríos. Desafortunadamente, esta preferencia ecológica ha hecho que la especie sea vulnerable al impacto humano, ya que estas mismas áreas son preferidas para el desarrollo agrícola y la expansión urbana. Las presiones antropogénicas desde fines del siglo XIX han reducido significativamente las poblaciones naturales, relegando muchas ocurrencias a grupos aislados principalmente a lo largo de cursos de agua y en áreas protegidas. A pesar de las presiones del hábitat, se han desarrollado protocolos de cultivo exitosos utilizando semillas, plántulas y esquejes, lo que permite una producción sustentable independiente de la recolección silvestre (A. Madrid & Silva, 2024).

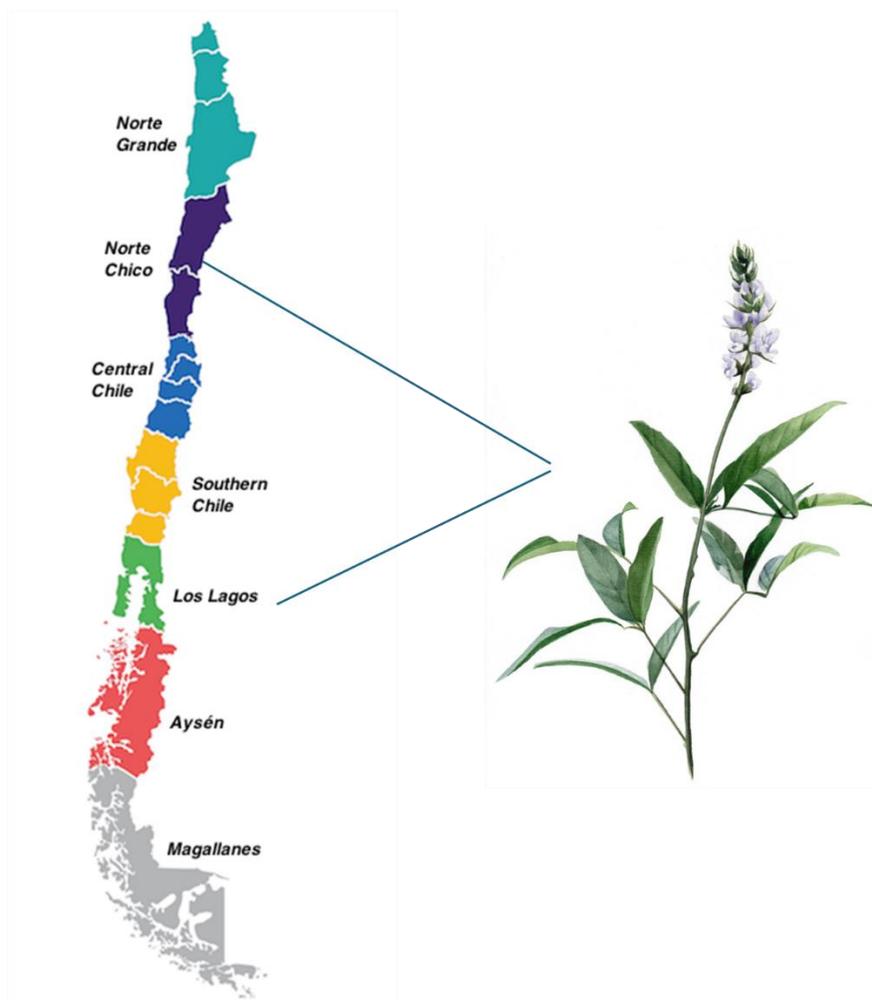


Figura 1: Mapa de distribución de *O. glandulosum* en Chile que muestra el rango geográfico desde las regiones de Coquimbo a Los Ríos con zonas de elevación.

2. Usos tradicionales y etnomedicinales

2.1. Contexto histórico

El uso terapéutico del culén se remonta siglos atrás a la colonización europea, representando un conocimiento indígena acumulado y refinado mediante la observación empírica y la transmisión cultural (Sartori & Prakofjewa, 2024). La evidencia arqueológica y etnográfica sugiere que las comunidades mapuches integraron esta especie en sistemas integrales de medicina tradicional que abordaban afecciones agudas y crónicas. Los primeros cronistas españoles documentaron el uso generalizado del culén entre las poblaciones indígenas, señalando su preparación en extractos acuosos y decocciones para el tratamiento de diversas dolencias, como trastornos digestivos, inflamatorios y metabólicos. La popularidad de la

planta se extendió más allá de las aplicaciones medicinales, ya que los colonos españoles adoptaron su uso como bebida refrescante, lo que llevó a su designación como "té indígena de Chile" (Farga, 1988). Los relatos históricos de los cronistas Ovalle y Rosales describen aplicaciones específicas durante los conflictos entre indígenas y españoles, donde el culén servía como vulnerario para lavar heridas y prevenir infecciones. El protocolo tradicional consistía en lavar las heridas con infusiones de hojas, seguido de la aplicación de compresas tibias de hojas, complementado con la aspersion de hojas secas molidas sobre las heridas para promover la cicatrización y prevenir infecciones.

2.2 Aplicaciones etnomedicinales

La importancia etnofarmacológica de *O. glandulosum* abarca un espectro terapéutico notablemente amplio, lo que refleja una comprensión sofisticada de la medicina vegetal, desarrollada a través de generaciones de observación empírica. Los curanderos tradicionales mapuche, conocidos como "machi", incorporaron el culén en protocolos de tratamiento integrales que abordaban múltiples aspectos del mantenimiento de la salud y el manejo de enfermedades (A. Madrid & Silva, 2024). El manejo tradicional de la diabetes representa una de las aplicaciones terapéuticas más significativas, con protocolos indígenas que especifican procedimientos de decocción prolongados con brotes y ramas de la planta. El método tradicional de preparación consiste en combinar 5 cucharadas de brotes o capullos de culén con 1,5 litros de agua, hervir la mezcla hasta reducirla a la mitad, filtrarla y consumir varias tazas al día durante periodos de dos semanas. Las preparaciones alternativas utilizan ramas peladas hervidas en agua durante periodos específicos, lo que demuestra una comprensión sofisticada de la optimización de la extracción y los protocolos de dosificación.

Las aplicaciones gastrointestinales constituyen otra categoría importante de uso tradicional, y el culén se emplea para tratar trastornos digestivos, en particular diarrea y disentería. La planta sirvió como tratamiento principal para el "empacho", un trastorno digestivo tradicional latinoamericano caracterizado por alteraciones del tránsito gastrointestinal causadas por la ingesta excesiva de alimentos o el consumo de alimentos indigestos (A. Madrid & Silva, 2024). Los curanderos tradicionales, conocidos como "medidores o quebradores de empacho", utilizaban métodos específicos de preparación que consistían en raspaduras de corteza hervidas con agua y sal, combinadas con técnicas de manipulación física para

restaurar la función digestiva. Las afecciones inflamatorias recibían un tratamiento extenso mediante diversas preparaciones de culén, siendo el tratamiento de las hemorroides una aplicación particularmente bien documentada. El protocolo tradicional consistía en preparar decocciones de hojas y realizar baños de asiento especializados, con los pacientes sentados sobre recipientes con soluciones tibias de culén durante períodos específicos, lo que demostraba un conocimiento avanzado de la administración tópica de fármacos y una exposición terapéutica sostenida.

Las aplicaciones para la cicatrización de heridas utilizaban métodos de consumo interno y externo, combinando efectos antimicrobianos con mecanismos antiinflamatorios. Las preparaciones tradicionales de cataplasma implicaban combinar hojas frescas con líquidos de decocción, creando formulaciones de liberación sostenida que mantenían concentraciones terapéuticas en los sitios de la herida mientras proporcionaban soporte sistémico mediante el consumo oral concurrente (A. Madrid & Silva, 2024). Las infecciones parasitarias, en particular las lombrices intestinales, recibían tratamiento mediante decocciones concentradas de hojas administradas en dosis específicas. El protocolo tradicional especificaba 1 cucharada de hojas por litro de agua recién hervida, consumida como una taza tres veces al día. Las concentraciones mejoradas utilizando 2 cucharadas por litro proporcionaban efectos sudoríficos y emolientes, demostrando una modulación terapéutica dependiente de la dosis. Los usos etnomedicinales de *O. glandulosum* en los países sudamericanos se resumen en **la Tabla 2.**

170

Tabla 2. Práctica etnomedicinal de *Otholobium glandulosum* en América del Sur (Krenisky et al., 1999).

Chile	Utilizado en problemas de la piel, heridas, lombrices intestinales, problemas digestivos, hemorroides, sífilis, antiinflamatorio, apetitivo y broncodilatador.
Perú	Se utiliza para trastornos gastrointestinales, hemorroides, indigestión, gusanos intestinales, diabetes, trastornos menstruales y heridas.
Bolivia	Utilizado como emenagogo.
Brasil	Se utiliza como antidiabético, diaforético, emoliente y vulnerario; para enteritis.

3. Composición fitoquímica y diversidad química

La complejidad química de *O. glandulosum* refleja una sofisticada maquinaria biosintética capaz de producir compuestos estructuralmente diversos de múltiples clases químicas. Investigaciones fitoquímicas exhaustivas han revelado una rica gama de constituyentes bioactivos responsables de las propiedades terapéuticas de la planta, siendo los meroterpenoides la clase dominante y de mayor importancia farmacológica. Investigaciones químicas iniciales (Erazo, 1990) establecieron la presencia de bakuchiol como un componente principal, junto con angelicina, drupanina y psoraleno de extractos de hojas. Este trabajo pionero sentó las bases para estudios exhaustivos de caracterización química posteriores que han revelado la diversidad química de la planta (Madrid et al., 2013). El análisis sistemático de la composición química del exudado resinoso se realizó mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas, identificando 13 compuestos que representan el 98 % de la composición total. El análisis reveló que los terpenos oxigenados constituyen el 92 % del exudado, y el bakuchiol por sí solo representa el 64 % del total.

Estudios de composición de aceite esencial por Montenegro (Montenegro et al., 2024) revelaron bakuchiol como el componente dominante en 85.4%, demostrando presencia consistente a través de diferentes matrices de plantas. El aceite esencial también contiene cantidades significativas de sesquiterpenos incluyendo cariofileno (3.70%), óxido de cariofileno (3.41%) y α -humuleno (0.57%), contribuyendo al perfil terapéutico general a través de mecanismos antimicrobianos y antiinflamatorios. Los derivados hidroxilados de bakuchiol proporcionan dimensiones terapéuticas mejoradas a través de dianas biológicas modificadas y capacidades mejoradas de eliminación de radicales. (Labbé, 1996) caracterizaron cuatro nuevos meroterpenoides de extractos de metanol de hojas: 3-hidroxibakuchiol, 12,13-dihidro-12,13-epoxibakuchiol, 12-hidroxiisobakuchiol, y Δ^3 -2-hidroxibakuchiol, demostrando que la maquinaria biosintética de *O. glandulosum* ha evolucionado para producir compuestos estructuralmente relacionados, pero funcionalmente diversos.

El descubrimiento del kuchiol representa (Madrid et al., 2013) un hallazgo químico significativo, ya que este diterpeno con fórmula molecular $C_{20}H_{28}O$ representa el primer compuesto de su clase estructural aislado de una fuente vegetal. La mayor longitud de la cadena carbonada en comparación con el bakuchiol sugiere vías biosintéticas alternativas o

reacciones de prenilación prolongadas, lo que proporciona información sobre la flexibilidad metabólica de esta especie. Los meroterpenoides cíclicos, específicamente el ciclobakuchiol A y B, fueron caracterizados por Backhouse et al. (1995) a partir de extractos de hojas con diclorometano. Estos compuestos resultan de reacciones de ciclización intramolecular y demuestran una mayor actividad antiinflamatoria en comparación con sus contrapartes lineales, lo que sugiere que la ciclización confiere una mayor estabilidad metabólica y penetración celular.

Los componentes de furocumarina proporcionan capacidades fotoquimioterapéuticas junto con actividades biológicas adicionales. El psoraleno y el isopsoraleno son furocumarinas lineales clásicas identificadas por Erazo et al. (1990) y Labbé et al. (1996), ofrecen aplicaciones fototerapéuticas establecidas para el tratamiento de la psoriasis y el vitiligo, mientras que la angelicina, una furocumarina angular, proporciona efectos hepatoprotectores y antiinflamatorios con un potencial fotosensibilizante reducido. Los componentes volátiles contribuyen significativamente al perfil terapéutico general a través de mecanismos antimicrobianos y antiinflamatorios, donde el cariofileno demuestra actividad antiinflamatoria a través de la inhibición de la COX, mientras que el α -humuleno exhibe una potente actividad antimicrobiana con una eficacia notable contra diversos patógenos (Montenegro et al., 2024). Las estructuras químicas de algunos compuestos aislados principales se muestran en la **Figura 2**.

172

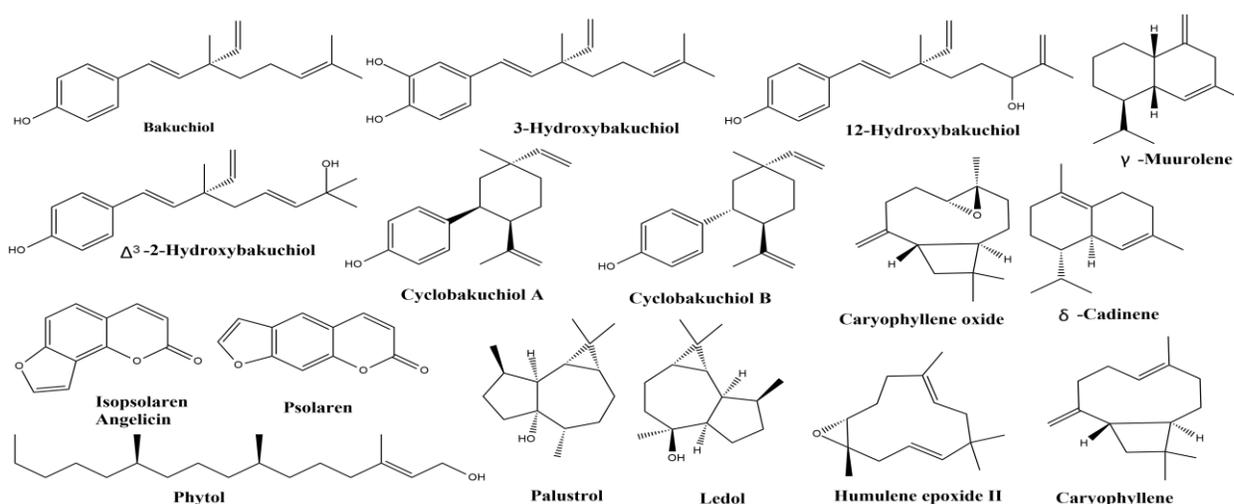


Figura 2: Estructura molecular de los principales compuestos aislados desde *O. glandulosum*.

4. Actividades biológicas y mecanismos terapéuticos

4.1 Propiedades farmacológicas

La eficacia terapéutica de *O. glandulosum* surge de los compuestos individuales y efectos sinérgicos dentro de extractos crudos. La actividad antidiabética representa una de las aplicaciones terapéuticas de mayor relevancia clínica, Krenisky et al. (1999) demostraron efectos significativos de reducción de glucosa utilizando bakuchiol aislado de la especie relacionada *Otholobium pubescens*, logrando una reducción notable de la glucosa a 150 mg/kg en ratones diabéticos db / db. Si bien este estudio utilizó material de una especie peruana en lugar de *O. glandulosum* específicamente, el contenido constante de bakuchiol en todas las especies de *Otholobium* sugiere un potencial terapéutico similar. El mecanismo antidiabético parece multifacético, involucrando la mejora directa de la captación de glucosa, efectos protectores de las células β y modulación de la vía de señalización de la insulina.

Las propiedades antimicrobianas abarcan tanto patógenos bacterianos como fúngicos, lo que respalda las aplicaciones tradicionales para afecciones infecciosas. Madrid et al. (2012) documentaron una actividad antifúngica integral contra aislados clínicos de *Candida*, donde el 3-hidroxi-bakuchiol demostró una potencia excepcional. El compuesto mostró valores de CMI_{80} de entre 0,125 y 16 $\mu\text{g}/\text{mL}$ contra diversas especies de *Candida*, lo que indica una eficacia de amplio espectro contra *C. guilliermondii* (0,125 $\mu\text{g}/\text{mL}$), *C. dubliniensis* (1,0 $\mu\text{g}/\text{mL}$) y *C. lusitaniae* (2,0 $\mu\text{g}/\text{mL}$). Investigaciones recientes de Montenegro et al. (2024) ampliaron las aplicaciones antimicrobianas al ámbito agrícola, demostrando una actividad significativa contra patógenos del cultivo del tomate. El aceite esencial mostró potentes efectos contra *Clavibacter michiganensis* con valores de MIC de 2-32 $\mu\text{g}/\text{mL}$, mientras que el α -humuleno mostró una actividad notable contra *Bacteroides fragilis* con concentraciones de 2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ inhibiendo el crecimiento en más del 90%.

La capacidad antioxidante representa una actividad biológica fundamental que subyace a muchos efectos terapéuticos. Estudios de Madrid et al. (2012, 2013) demostraron una eliminación superior de radicales libres en comparación con los antioxidantes sintéticos BHA y BHT. El exudado resinoso exhibió valores de CI_{50} de DPPH de 0,76 $\mu\text{g}/\text{mL}$, mientras que el 3-hidroxi-bakuchiol demostró la actividad más potente a 0,34 $\mu\text{g}/\text{mL}$. Esta actividad superior se atribuye a la estructura orto-difenol que permite una neutralización eficiente de radicales a través de la formación de quinonas y la estabilización por resonancia. Los

mecanismos antioxidantes se extienden más allá de la simple eliminación de radicales para incluir la quelación de metales, la inhibición enzimática y los efectos protectores celulares, con ensayos FRAP (poder antioxidante reductor férrico) que revelan una capacidad reductora significativa, incluyendo el kuchiol que demuestra equivalentes de Trolox de 3,12 mM a pesar de su actividad moderada de DPPH.

Las investigaciones contra el cáncer se han centrado principalmente en líneas celulares de melanoma, revelando citotoxicidad selectiva mientras que preservan los fibroblastos normales. Madrid et al. (2015) demostraron que los exudados resinosos y compuestos purificados inducen apoptosis a través de múltiples vías que incluyen la regulación positiva de p53 y los efectos mediados por ROS. El bakuchiol mostró valores de CI_{50} de 29,3 μ M contra células de melanoma A2058, mientras que el 3-hidroxibakuchiol demostró valores CI_{50} de 35,1 μ M y el 12-hidroxiisobakuchiol mostró valores de 32,3 μ M. El acetato de bakuchiol semisintético demostró una actividad mejorada a 16,9 μ M, representando el derivado más potente identificado y sugiriendo que enmascarar el grupo hidroxilo fenólico mejora la penetración celular o altera las vías metabólicas.

Las actividades antiinflamatorias y antipiréticas fueron caracterizadas sistemáticamente por Backhouse et al. (2001), quienes demostraron que los derivados cíclicos del bakuchiol proporcionan efectos mejorados en comparación con los compuestos originales. El mecanismo implica la modulación de la función de los neutrófilos, la reducción de la liberación de mediadores inflamatorios, la disminución de la migración celular y la interferencia de la vía de los eicosanoides. El ciclobakuchiol B demostró eficacia con una reducción de fiebre del 68 % a 17 mg/kg en modelos de fiebre en conejos, mientras que los ciclobakuchiol A y B mostraron un aumento del 15 %. Los efectos antiinflamatorios respaldan los usos tradicionales para la cicatrización de heridas y afecciones inflamatorias, y la capacidad de modular la degranulación de los neutrófilos sugiere posibles aplicaciones en afecciones caracterizadas por respuestas inflamatorias excesivas. Algunos estudios importantes sobre fitoquímicos aislados de *O. glandulosum* se resumen en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Perfil fitoquímico completo y actividades biológicas de los compuestos de *O. glandulosum*.

Compuesto	Clase	Fuente y contenido	Actividad biológica	Referencia
Bakuchiol	Meroterpenoide	Aceite esencial (85,42%), exudado resinoso (64,0%)	Antidiabético: reducción de glucosa de 150 mg/kg en ratones db/db ¹ ; Antimicrobiano: CMI 2-32 µg /mL frente a <i>C. michiganensis</i> ; Anticáncer: CI ₅₀ 29,3 µM frente a melanoma A2058; Antioxidante: CI ₅₀ 1,36 µg /mL de DPPH	Erazo et al., 1990; Krenisky et al., 1999 ¹ ; Madrid et al., 2013, 2015; Montenegro y otros, 2024
3-hidroxibakuchiol	Meroterpenoide	Exudado resinoso (9,6%), hojas	Antifúngico: MIC ₈₀ 0,125-16 µg /mL frente a <i>Candida</i> spp.; Anticancerígeno: IC ₅₀ 35,1 µM frente a melanoma; Antioxidante: DPPH IC ₅₀ 0,34 µg /mL	Labbé et al., 1996; Madrid et al., 2012, 2015

Kuchiol	Diterpeno	Exudado resinoso (6,2%)	Nuevo compuesto (C ₂₀ H ₂₈ O) aislado por primera vez de una planta; Antioxidante: DPPH IC ₅₀ 1,96 µg/mL, FRAP 3,12 mM	Madrid y otros, 2013
12-Hidroxiisobakuchiol	Meroterpenoide	Exudado resinoso (4,5%), hojas	Anticáncer: IC ₅₀ 32,3 µM frente a melanoma A2058; Antioxidante: Actividad FRAP	Labbé et al., 1996; Madrid y otros, 2015
Ciclobakuchiol A	Meroterpenoide cíclico	Exudado resinoso (3,5%), hojas	Antiinflamatorio: 15% mejorado frente al bakuchiol; inhibición de la degranulación de neutrófilos	Backhouse y otros, 1995, 2001; Madrid y otros, 2013
Ciclobakuchiol B	Meroterpenoide cíclico	Exudado resinoso (3,9%), hojas	Antiinflamatorio: actividad mejorada; Antipirético: reducción de fiebre del 68% a 17 mg/kg	Backhouse y otros, 1995, 2001; Madrid y otros, 2013
12,13-Dihidro-12,13-epoxibakuchiol	Meroterpenoide	Hojas (extracto de metanol)	Estructura: derivado epoxídico del bakuchiol; Actividad bajo investigación	Labbé y otros, 1996
Δ ³ -2-hidroxiisobakuchiol	Meroterpenoide	Hojas (extracto	Estructura: derivado de	Labbé y otros, 1996

		de metanol)	bakuchiol hidroxilado; Caracterización de la actividad biológica en curso.	
Acetato de bakuchiol	Semisintético	Derivado sintético	Anticáncer: IC ₅₀ 16,9 μM (más potente frente al melanoma); lipofilidad mejorada	Madrid y otros, 2015
Psoraleno	Furocumarina	extractos de hojas	Fototerapéutico: tratamiento de psoriasis/vitíligo; Actividad antiinflamatoria	Erazo et al., 1990; Labbé et al., 1996
Isopsoraleno	Furocumarina	extractos de hojas	Aplicaciones fototerapéuticas; Actividad antimicrobiana	Labbé y otros, 1996
Angelicina	Furocumarina	extractos de hojas	Hepatoprotector: protección hepática; efectos antiinflamatorios	Erazo y otros, 1990
Drupanina éster metílico	éster de cumarina	extractos de hojas	Estructura: derivado de cumarina metilado	Erazo y otros, 1990
Cariofileno	Sesquiterpeno	Aceite esencial (3,70%)	Antiinflamatorio: inhibición de COX; antimicrobianos vs. fitopatógenos	Becerra et al., 2010; Montenegro y otros, 2024

óxido de cariofileno	Óxido de sesquiterpeno	Aceite esencial (3,41%), exudado resinoso (0,6%)	Antimicrobiano: inhibición del crecimiento fúngico; Actividad antiinflamatoria	Madrid et al., 2013; Montenegro y otros, 2024
α -humuleno	Sesquiterpeno	Aceite esencial (0,57%)	Antimicrobiano: 2 μ g /mL inhibe el crecimiento de <i>Bacteroides fragilis</i> >90%; Antiinflamatorio	Montenegro y otros, 2024
δ -cadineno	Sesquiterpeno	Aceite esencial (0,50%)	Antimicrobiano: efectos sinérgicos con otros terpenos	Montenegro y otros, 2024
Palustrol	alcohol sesquiterpénico	Aceite esencial (0,50%)	Estructura: alcohol bicíclico; Contribuyente antimicrobiano	Montenegro y otros, 2024
Ledol	alcohol sesquiterpénico	Aceite esencial (0,28%)	Antimicrobiano: actividad moderada; presente en múltiples especies de <i>Psoralea</i>	Becerra et al., 2010; Montenegro y otros, 2024
Epóxido de humuleno II	Óxido de sesquiterpeno	Aceite esencial (0,30%)	Estructura: derivado de humuleno oxidado; Actividad antimicrobiana	Montenegro y otros, 2024

γ - Muuroleno	Sesquiterpeno	Aceite esencial (0,87%)	Antimicrobiano: contribuye a la bioactividad de los aceites esenciales	Montenegro y otros, 2024
Fitol	Alcohol diterpénico	Aceite esencial (variable)	Antimicrobiano: actividad de amplio espectro; Antioxidante: eliminación de radicales lipofílicos	Becerra y otros, 2010

¹Estudios antidiabéticos realizados utilizando bakuchiol de *Otholobium pubescens* (especie peruana)

4.2 Relaciones estructura-actividad

Las diversas actividades biológicas de los compuestos de *O. glandulosum* permiten el análisis sistemático de las relaciones estructura-actividad, lo que proporciona información para el diseño y la optimización racional de fármacos. La comparación entre el bakuchiol y el 3-hidroxi-bakuchiol revela el impacto de grupos hidroxilo adicionales en la actividad biológica, donde la disposición orto-difenol mejora la capacidad antioxidante y la actividad antifúngica. Las modificaciones de la longitud de cadena, ejemplificadas por la estructura extendida del kuchiol en comparación con el bakuchiol, demuestran que el aumento de la cadena isoprenoide reduce la actividad antioxidante, lo que sugiere rangos óptimos de lipoficidad para la penetración celular. Los efectos de ciclización, observados en los derivados del ciclobakuchiol, proporcionan una mayor actividad antiinflamatoria mediante una mejor estabilidad metabólica y la alteración de las interacciones con dianas. Las modificaciones semisintéticas demuestran potencial para la optimización terapéutica más allá de los productos naturales, donde el acetato de bakuchiol muestra una mayor actividad anticancerígena en comparación con el compuesto original, lo que sugiere que el enmascaramiento del grupo hidroxilo fenólico mejora la penetración celular o altera las vías metabólicas (Madrid et al., 2015).

5. Bakuchiol: un componente bioactivo importante con amplias implicaciones terapéuticas

5.1 Importancia de la química medicinal y ocurrencia entre especies

Como componente bioactivo predominante en *O. glandulosum*, que representa el 85 % del aceite esencial y el 64 % de los exudados resinosos, el bakuchiol ha surgido como un compuesto de gran interés en la química medicinal, que se extiende mucho más allá de su fuente tradicional. Este fenol meroterpenoide demuestra una consistencia notable en múltiples especies de *Psoralea* y *Otholobium*, lo que lo establece como un compuesto marcador característico para la estandarización terapéutica. (Qiao et al., 2007) La estructura química única del compuesto, que presenta fracciones terpenoides y fenólicas, subyace a sus diversas actividades farmacológicas y lo posiciona como un valioso andamiaje para el desarrollo de la química medicinal. Los métodos integrales de identificación por HPLC permiten una cuantificación precisa en diferentes fuentes vegetales y métodos de procesamiento (Zhu et al., 2025). Esta capacidad de estandarización resulta esencial para garantizar resultados terapéuticos consistentes y el cumplimiento normativo en aplicaciones clínicas.

5.2 Traducción Clínica y Medicina Dermatológica

La exitosa transición del bakuchiol de la medicina tradicional a aplicaciones dermatológicas representa un paradigma para el desarrollo de productos naturales. Una extensa validación clínica ha establecido el bakuchiol como una alternativa natural a los retinoides, con revisiones sistemáticas que identifican quince ensayos clínicos en humanos que demuestran su eficacia en el envejecimiento facial, el acné y la hiperpigmentación (Fanning et al., 2024). A diferencia de los retinoides convencionales, el bakuchiol exhibe perfiles de tolerancia superiores, manteniendo una eficacia antienvjecimiento comparable mediante mecanismos multidireccionales que incluyen una mayor síntesis de colágeno, una regeneración epidérmica acelerada y una potente actividad antioxidante (Bluemke et al., 2022).

Las formulaciones clínicas que incorporan bakuchiol con ingredientes complementarios, como derivados de la vitamina C y péptidos bioactivos, han demostrado mejores resultados terapéuticos en el tratamiento de afecciones cutáneas preenvejecidas, con mejoras significativas en la textura, la uniformidad del tono y la calidad general de la piel (Farris et

al., 2025). Se han desarrollado sistemas de administración avanzados, que incluyen nanoemulsiones especializadas, para optimizar la penetración cutánea y alcanzar concentraciones tisulares terapéuticamente relevantes a pesar de la lipofiliidad inherente del bakuchiol (Syafitri & Kalia, 2025).

5.3 Seguridad metabólica y consideraciones farmacocinéticas

Estudios metabólicos exhaustivos han dilucidado las vías de biotransformación del bakuchiol, revelando tanto beneficios terapéuticos como importantes consideraciones de seguridad relevantes para el desarrollo clínico. El compuesto experimenta un metabolismo extenso a través de las enzimas del citocromo P450, en particular CYP2C19, y su bioactivación produce metabolitos desintoxicantes e intermediarios potencialmente reactivos (Chi et al., 2016; A. Li et al., 2012). Si bien las dosis terapéuticas muestran perfiles de seguridad favorables, la exposición prolongada a dosis altas puede contribuir a la hepatotoxicidad al interferir con las vías del metabolismo lipídico, lo que requiere una optimización cuidadosa de la dosis en aplicaciones clínicas (Z.-J. Li et al., 2017).

181

5.4 Nuevos mecanismos terapéuticos y aplicaciones

Además de las actividades documentadas en estudios sobre *O. glandulosum*, el bakuchiol demuestra mecanismos únicos que amplían significativamente su potencial terapéutico. El compuesto exhibe novedosas propiedades antivirales contra bacterias patógenas, actuando como un inhibidor de quórum-sensing que reduce la producción de factores de virulencia sin generar presión selectiva para el desarrollo de resistencia (Zeng et al., 2024). Este mecanismo representa una estrategia prometedora para combatir infecciones resistentes a los antibióticos, preservando al mismo tiempo el microbiota beneficioso.

Han surgido aplicaciones neurológicas gracias a la capacidad del bakuchiol para modular la síntesis y transmisión de acetilcolina, con eficacia demostrada en la reducción de la acumulación de β -amiloide y la mejora de la función cognitiva mediante la activación de vías neuroprotectoras (Ranjan et al., 2024). Las propiedades antineuroinflamatorias del compuesto, mediadas por la inhibición selectiva de la activación microglial, sugieren posibles aplicaciones en enfermedades neurodegenerativas caracterizadas por inflamación crónica (Lim et al., 2019).

5.5 Aplicaciones oncológicas avanzadas

Si bien los estudios sobre melanoma realizados con extractos de *O. glandulosum* establecieron un potencial anticancerígeno inicial, investigaciones posteriores han revelado las amplias aplicaciones oncológicas del bakuchiol en múltiples tipos de cáncer. El compuesto demuestra eficacia contra cánceres hormonodependientes mediante actividades duales estrogénicas y antiestrogénicas: la activación de ER α a dosis bajas favorece las aplicaciones para la salud ósea, mientras que la activación de ER β a dosis altas promueve efectos antiproliferativos en el cáncer de mama (L. Li et al., 2016). Derivados mejorados, como los nuevos conjugados de aminoguanidina, muestran una selectividad superior para las células de cáncer de mama triple negativo, a la vez que mantienen una toxicidad mínima para los tejidos normales (Zhang et al., 2024).

Estudios mecanísticos han identificado dianas moleculares directas del bakuchiol, como las quinasas Hck, Blk y p38 MAP, lo que permite el diseño racional de estrategias terapéuticas mejoradas (Kim et al., 2016). La capacidad del compuesto para sensibilizar las células cancerosas a la apoptosis mediada por TRAIL mediante la modulación de las vías ROS y JNK proporciona mecanismos terapéuticos adicionales para las terapias oncológicas combinadas (Park et al., 2016).

5.6 Producción sostenible y desarrollo futuro

La creciente demanda terapéutica de bakuchiol ha impulsado el desarrollo de enfoques biosintéticos sostenibles para superar las limitaciones de la extracción vegetal. Avances revolucionarios en ingeniería metabólica han permitido la biosíntesis de novo en *Saccharomyces cerevisiae*, logrando mejoras notables en la producción mediante la optimización sistemática de las vías biosintéticas (Zheng et al., 2024). Este enfoque sostenible garantiza una calidad constante a la vez que aborda las preocupaciones ambientales asociadas con la cosecha de plantas a gran escala.

5.7 Integración con conocimientos de medicina tradicional

El perfil medicinal integral del bakuchiol valida las aplicaciones terapéuticas tradicionales de *O. glandulosum*, a la vez que amplía la comprensión de sus mecanismos subyacentes. Su

presencia como principal componente bioactivo explica muchos de los efectos tradicionales observados, desde la cicatrización de heridas y afecciones inflamatorias hasta trastornos metabólicos y enfermedades infecciosas. Esta validación científica respalda la exploración continua de los sistemas de medicina tradicional, a la vez que sienta las bases para el desarrollo terapéutico basado en la evidencia.

El exitoso desarrollo del bakuchiol, desde un componente de remedio tradicional hasta un agente terapéutico clínicamente validado, demuestra el valor de integrar el conocimiento etnobotánico con los enfoques modernos de la química medicinal. A medida que la investigación continúa dilucidando nuevas aplicaciones terapéuticas y optimizando los sistemas de administración, el bakuchiol representa un puente prometedor entre la sabiduría de la medicina tradicional y la terapéutica contemporánea basada en la evidencia, ofreciendo un potencial significativo para abordar diversas afecciones médicas mediante un agente terapéutico de origen natural bien caracterizado.

6. Aplicaciones agrícolas y ambientales

Las recientes ampliaciones de investigación han identificado importantes aplicaciones agrícolas para los extractos de *O. glandulosum*, en particular en estrategias sostenibles de protección de cultivos. El espectro antimicrobiano abarca patógenos agrícolas tanto bacterianos como fúngicos, lo que proporciona capacidades de protección de cultivos de amplio espectro. Madrid et al. (2014) evaluaron la actividad contra *Botrytis cinerea* y *Phytophthora cinnamomi*, demostrando una inhibición significativa del crecimiento micelial. El bakuchiol logró una inhibición del 94% de *B. cinerea* a 150 mg/L, mientras que el psoraleno redujo el crecimiento de *P. cinnamomi* en un 80% a concentraciones equivalentes, lo que sugiere posibles aplicaciones en la protección de cultivos de alto valor donde las alternativas sintéticas enfrentan restricciones crecientes.

CONCLUSIONES

Otholobium glandulosum representa un ejemplo notable de cómo la investigación sistemática en química medicinal puede validar y ampliar el conocimiento terapéutico tradicional, revelando sofisticadas relaciones estructura-actividad y diversos mecanismos moleculares que subyacen a su eficacia farmacológica. La caracterización exhaustiva de más de veinte compuestos bioactivos, en particular el meroterpenoide bakuchiol y sus derivados, demuestra la complejidad química de la planta y proporciona una base racional para sus amplias aplicaciones terapéuticas, desde el control de la diabetes hasta la cicatrización de heridas y afecciones inflamatorias. La exitosa transferencia del bakuchiol de la medicina tradicional a aplicaciones dermatológicas clínicamente validadas, combinada con la evidencia emergente de sus actividades neurológicas, oncológicas y antimicrobianas, ilustra el potencial para el desarrollo de fármacos basados en la evidencia a partir de fuentes etnobotánicas. Mediante un análisis detallado de la relación estructura-actividad y estudios mecanísticos, esta investigación no solo valida siglos de uso tradicional, sino que también revela nuevas posibilidades terapéuticas, posicionando a *O. glandulosum* como un valioso modelo para integrar el conocimiento de la medicina tradicional con la ciencia farmacéutica moderna para desarrollar intervenciones terapéuticas seguras, eficaces y culturalmente significativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Backhouse, N., Delporte, C., Negrete, R., Cassels, B., Schneider, C., Breitmaier, E. y San Feliciano, A. (1995). Ciclobakuchioles A y B de *Psoralea glandulosa*. *Fitoquímica*, 40, 325-327.

Backhouse, N., Delporte, C., Negrete, R., Erazo, S., Zúñiga, A., Pinto, A., & Cassels, B. (2001). Componentes activos aislados de *Psoralea glandulosa* L. con actividades antiinflamatorias y antipiréticas. *Revista de Etnofarmacología*, 78, 27-31.

Becerra, J., Bittner, M., Hernández, V., Brintrup, C., & Silva, M. (2010). Actividad de aceites esenciales de Canelo, Queule, Bailahuén y Culén frente a hongos fitopatógenos. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 9, 212-215.

Bluemke, A., Zillich, OV, Carle, R. y Schweiggert, RM (2022). Actividad multidireccional del bakuchiol contra los mecanismos celulares del envejecimiento facial: evidencia experimental para un enfoque de tratamiento holístico. *Revista Internacional de Ciencias Cosméticas*, 44 (3), 377-393. <https://doi.org/10.1111/ics.12784>

Chi, M., Peng, Y. y Zheng, J. (2016). Caracterización de conjugados de glutatión derivados de metabolitos reactivos de bakuchiol. *Interacciones químico-biológicas*, 244, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.12.009>

Egan, AN, Bello, A., Stirton, CH, Chimpango, SBM y Muasya, AM (2025). Un análisis filogenético exhaustivo de la tribu Psoraleae (Fabaceae) respalda la segregación de *Otholobium* sudamericano como un nuevo género *Grimolobium*. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 208 (4), 369-385. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boae083>

Erazo, S., García, R., & Delle Monache, F. (1990). Bakuchiol y otros compuestos de *Psoralea glandulosa*. *Revista Latinoamericana de Química*, 21, 62.

Fanning, JE, McGee, SA, e Ibrahim, OI (2024). Ensayos clínicos en humanos con formulaciones tópicas de bakuchiol para el tratamiento de afecciones cutáneas: Una revisión sistemática. *Journal of Drugs in Dermatology*, 23 (4), 239-243. <https://doi.org/10.36849/JDD.7763>

Farga, CLJHA (1988). *Plantas medicinales de uso común en Chile*. Paesmi.

Farris, P., Frey, C., Parsa, R., Miller, D., Shyr, T. y Li, W.-H. (2025). Un enfoque científico para definir, evaluar y tratar el preenvejecimiento con un régimen cosmético que

contiene un nuevo péptido cosmético, el acetil dipéptido-31 amida (AP31). *Journal of Drugs in Dermatology*, 24 (5), 51181s4-51181s14. <https://doi.org/10.36849/JDD.51181>

Kim, J.-E., Son, JE, Jung, SK, Kang, NJ, Lee, CY, Lee, KW y Lee, HJ (2016). El bakuchiol suprime la proliferación de células de cáncer de piel al actuar directamente sobre las quinasas Hck , Blk y p38 MAP. *Oncotarget* , 7 (12), 14616-14627. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.7524>

Krenisky, JM, Luo, J., Reed, MJ y Carney, JR (1999). Aislamiento y actividad antihiperoglucémica del bakuchiol de *Otholobium pubescens* (Fabaceae), una planta medicinal peruana utilizada para el tratamiento de la diabetes. *Boletín Biológico y Farmacéutico*, 22 (10), 1137-1140. <https://doi.org/10.1248/bpb.22.1137>

Labbé, C., Faini, F., Coll, J. y Connolly, J. D. (1996). Derivados de bakuchiol de las hojas de *Psoralea glandulosa*. *Fitoquímica* , 42 , 1299-1303.

Li, A., Shen, G., Jiao, S., Li, H. y Wang, Q. (2012). La desintoxicación metabólica del bakuchiol está mediada por enzimas del citocromo P450 en microsomas hepáticos humanos. *Revista de Ciencias de la Salud de la Universidad de Pekín*, 44 (3), 431-436.

Li, L., Chen, X., Liu, CC, Lee, LS, Man, C. y Cheng, SH (2016). El fitoestrógeno bakuchiol exhibe efectos anticánceres de mama in vitro e in vivo al inducir la detención de la fase S y la apoptosis. *Frontiers in Pharmacology* , 7 , 128. <https://doi.org/10.3389/fphar.2016.00128>

Li, Z.-J., Zhao, Y.-L., Wu, S.-M., Zhu, X., Su, W.-W., Ma, X. y Jiang, J.-G. (2017). El bakuchiol contribuye a la hepatotoxicidad de *Psoralea corylifolia* en ratas. *Phytotherapy Research* , 31 (8), 1265-1272. <https://doi.org/10.1002/ptr.5851>
vía de señalización p38 MAPK/ERK . *Revista Internacional de Ciencias Moleculares* , 20 (14), 3574. <https://doi.org/10.3390/ijms20143574>

Madrid, A., Díaz, K., González, C., Catalán, K., & Espinoza, L. (2014). Actividad antifitopatogena de *Psoralea glandulosa* (Fabaceae) contra *Botrytis cinerea* y *Phytophthora cinnamomi* . *Investigación de productos naturales* , 29 , 586-588.

Madrid, A., Espinoza, L., González, C., Mellado, M., Villena, J., Santander, R., Silva, V., & Montenegro, I. (2012). Estudio antifúngico del exudado resinoso y de meroterpenoides aislados de *Psoralea glandulosa* (Fabaceae). *Revista de Etnofarmacología* , 144 , 809-811.

Madrid, A., Espinoza, L., Mellado, M., Osorio, M., Montenegro, I., & Jara, C. (2012). Evaluación de la capacidad antioxidante de extractos de *Psoralea glandulosa* L. (Fabaceae). *Revista de la Sociedad Química de Chile*, 57, 1328-1332.

Madrid, A., Jara, C., Espinoza, L., Santander, R., Mellado, M., González, C., Villena, J., & Montenegro, I. (2013). Estudio de la composición química del exudado resinoso aislado de *Psoralea glandulosa* y evaluación de las propiedades antioxidantes de los terpenoides y de la resina. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 12, 338-345.

Madrid, A., Cardile, V., González, C., Montenegro, I., Villena, J., Caggia, S., Graziano, A., & Russo, A. (2015). *Psoralea glandulosa* como fuente potencial de agentes anticancerígenos para el tratamiento del melanoma. *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, 16, 7944-7959.

Madrid, A., & Silva, V. (2024). Pasado, presente y futuro de *Psoralea glandulosa* Linn, planta medicinal chilena, un recurso inagotable: una revisión de la literatura. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 23 (3), 336-348. <https://doi.org/10.37360/blacpma.24.23.3.23>

Montenegro, I., Villena, J., Madrid, A., González, C. y Silva, V. (2024). Composición del aceite esencial y actividad antimicrobiana de *Otholobium glandulosum* contra patógenos del cultivo del tomate. *Investigación de Productos Naturales*, 38 (2), 245-252.

Montenegro, I., Villena, J., Madrid, A., González, C. y Silva, V. (2024). Efectos bactericidas naturales del aceite esencial de *Psoralea glandulosa* para el control del cancro bacteriano y la mancha en tomate. *Agronomía*, 14 (11), 2615. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112615>

Park, MH, Kim, JH, Chung, Y.-H. y Lee, SH (2016). El bakuchiol sensibiliza las células cancerosas a TRAIL mediante la sobreexpresión de los receptores de muerte celular mediada por ROS y JNK y la desregulación de las proteínas de supervivencia. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 473 (2), 586-592. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.03.127>

Qiao, C.-F., Han, Q.-B., Song, J.-Z., Mo, S.-F., Kong, L.-D., Kung, H.-F. y Xu, H.-X. (2007). Huella química y análisis cuantitativo de Fructus psoraleae mediante cromatografía líquida de alta resolución. *Journal of Separation Science*, 30 (6), 813-818. <https://doi.org/10.1002/jssc.200600339>

Ranjan, S., Trivedi, S., Sharma, S., Khan, S. y Pandey, R. (2024). El bakuchiol modula la síntesis de acetilcolina y alivia la proteotoxicidad del A β . *Natural Product Research* , 38 (21), 3876-3880. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2265040>

Sartori, M., y Prakofjewa , J. (2024). Cultivando la ignorancia ambiental: No circulación del conocimiento etnomedicinal sobre Culén (*Otholobium glandulosum*) en el mundo atlántico (1646-1810). *Plantas*, 13 (20), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants13202861>

Syafitri, E., y Kalia, YN (2025). Administración cutánea y biodistribución de un producto natural lipofílico, el bakuchiol: Comparación del rendimiento de los nanotransportadores. *Revista Internacional de Farmacia*, 681, 125886. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125886>

Zeng, J., Zhang, Z., Chen, C., Zheng, D., Cai, P. y Huang, W. (2024). El monómero bakuchiol, utilizado en la medicina tradicional china, atenúa la patogenicidad de *Pseudomonas aeruginosa* mediante la acción dirigida de PqsR . *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, 26 (1), 243. <https://doi.org/10.3390/ijms26010243>

Zhang, Z., Zhu, J., Wang, J., Chen, J., Pang, Y. y Wu, C. (2024). Un nuevo derivado de bakuchiol aminoguanidina induce la apoptosis en células de cáncer de mama humano triple negativo. *Zhejiang Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban*, 53 (4), 509-518. <https://doi.org/10.3724/zdxbyxb-2024-0070>

Zheng, Y.-L., Xu, Y., Liu, Y.-Q., Zhao, Q.-W. y Li, Y.-Q. (2024). Biosíntesis de novo de un meroterpeno bioactivo, el bakuchiol, en levaduras. *ACS Synthetic Biology* , 13 (11), 3600-3608. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.4c00416>

Zhu, X., Wang, Z., Lu, J., Xie, Y., Liu, J., Huang, X. y Ma, X. (2025). Ojo electrónico integrado, nariz electrónica y cromatografía líquida de alta resolución para la identificación de *Psoralea corylifolia* fructus cruda y procesada en sal. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 263, 116915. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2025.116915>

**MÁS ALLÁ DEL JUEGO: *ESCAPE*
ROOMS Y DESARROLLO DEL
TALENTO HUMANO³⁹**

**BEYOND THE GAME: ESCAPE
ROOMS AND HUMAN TALENT
DEVELOPMENT**

Camila Salazar Ramírez⁴⁰

Eliana Quiroz-González⁴¹

Sebastián Pinzón-Salazar⁴²

189

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.⁴³

³⁹ Derivado del proyecto de investigación CI- 024 -20: Aportes de la gamificación al desarrollo de organizaciones saludables.

⁴⁰Psicóloga, Universidad Católica de Pereira, joven investigadora, Universidad Católica de Pereira, camila1.salazar@ucp.edu.co

⁴¹Psicóloga, Universidad Católica de Pereira, magíster en Gerencia del Talento Humano, Universidad de Manizales, docente-investigadora, Universidad Católica de Pereira, eliana.quiroz@ucp.edu.co

⁴² Ingeniero industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, magíster en ingeniería, Universidad EAFIT, docente, Universidad Católica de Pereira, sebastian.pinzon@ucp.edu.co

⁴³ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

Los *escape rooms* se han consolidado como una herramienta eficaz para el desarrollo de competencias. En los últimos años, han ganado relevancia en la agenda investigativa. Este capítulo de libro tiene como objetivo describir la relación entre el uso de *escape rooms* y el desarrollo del talento humano en las organizaciones. La evidencia empírica muestra que, al pasar por esta metodología, los trabajadores fortalecen habilidades necesarias para optimizar su desempeño y contribuir al logro de los objetivos organizacionales. A pesar de su carácter innovador y los múltiples beneficios asociados, el uso de los *escape rooms* en contextos organizacionales aún constituyen un campo emergente en la investigación. En consecuencia, se recomienda seguir promoviendo su aplicación en articulación con las estrategias formativas en pro del desarrollo humano y organizacional.

PALABRAS CLAVE: aprendizaje, *escape room*, lúdica, gamificación, metodologías activas, organizaciones, talento humano.

ABSTRACT

Escape rooms have emerged as an effective tool for competency development. In recent years, they have gained increasing relevance within the research agenda. This chapter aims to describe the relationship between the use of escape rooms and the development of human talent within organizations. Empirical evidence shows that, through this methodology, employees strengthen essential skills to optimize their performance and contribute to achieving organizational goals. Despite their innovative nature and the multiple associated benefits, the use of escape rooms in organizational contexts remains an emerging field of research. Consequently, it is recommended to continue promoting their application in alignment with training strategies aimed at fostering both human and organizational development.

Keywords: learning, escape room, gamification, active methodologies, organizations, human talent.

INTRODUCCIÓN

Los desarrollos tecnológicos han transformado los procesos de enseñanza-aprendizaje en entornos educativos y organizacionales (Santana & de Deus Lopes, 2020). La evidencia sugiere que el modelo de enseñanza tradicional se ve desafiado por las exigencias del siglo XXI y plantea un reto para promover un aprendizaje autónomo, dinámico, lúdico e innovador en los trabajadores (Abril et al., 2024; Gómez-Gómez, 2023).

Una alternativa ante a estas exigencias corresponde al uso de metodologías activas de aprendizaje. En este sentido, el objetivo de este capítulo es presentar una revisión de la literatura sobre el uso de los *escape rooms* como una metodología activa de aprendizaje y su relación con el desarrollo de competencias en el ámbito organizacional. En primer lugar, se abordan las metodologías activas de aprendizaje como una herramienta útil para la capacitación; en segundo lugar, se mencionan las características fundamentales de los *escape rooms*, teniendo en cuenta sus beneficios y limitaciones. Además, se exponen estudios que permiten visibilizar la aplicación de este tipo de prácticas en contextos empresariales; y finalmente, se plantean conclusiones y recomendaciones.

192

DESARROLLO

Metodologías activas en entornos educativos y empresariales

En las organizaciones, el conocimiento y la innovación cumplen un papel fundamental, pues posibilitan el desarrollo de diversas competencias que, como resultado, mejoran el desempeño laboral, la productividad, la competitividad y la sostenibilidad organizacional (Agudelo-Orrego, 2019).

Las investigaciones resaltan la importancia de la capacitación mediante estrategias lúdicas, pues estas tienen mayor impacto en el aprendizaje respecto al modelo de enseñanza tradicional (Ghezzi et al., 2021; Quiroz-González, et al., 2021). En esta línea, Santana y de Deus (2020) identifican la necesidad de promover el aprendizaje en contextos reales a través de la experiencia y la práctica; así como fortalecer el equilibrio entre las habilidades técnicas y sociales.

Las metodologías activas de aprendizaje gracias a sus componentes dinámicos facilitan la retroalimentación, conciben los errores como parte del proceso de aprendizaje, aumentan la motivación, la socialización y la creatividad. Todo esto se convierte en argumentos para favorecer su implementación en entornos educativos y empresariales (Grande-de-Prado et al., 2020).

En el ámbito educativo, el uso de estas metodologías contribuye a la mejora continua de la calidad educativa (Chacón-Chacón et al., 2024). Sus aplicaciones son diversas desde una mirada disciplinar, lo que ha permitido introducir contenidos relacionados con la inteligencia emocional, la educación ambiental, la educación en cuidados paliativos y el fortalecimiento del rendimiento académico (Quiroz-González, et al., 2025, Giráldez et al., 2022; Marlés Betancourt et al., 2024; Reigada et al., 2023).

Una revisión de literatura realizada por Ghezzi et al., (2021), señala que estas metodologías favorecen la integración entre lo teórico y lo práctico, estimulan el pensamiento crítico, la toma de decisiones e incrementa la autoconfianza del estudiante, lo que a su vez lo hace más creativo frente a las demandas del mercado laboral.

El contexto empresarial también ha incorporado estas herramientas, algunas aplicaciones han funcionado para promover la comunicación positiva, aumentar el compromiso, el autocontrol, el disfrute laboral y la productividad (Quiroz-González, et al., 2021; Gerdenitsch et al., 2020; Santana y de Deus, 2020; Wibisono et al., 2023).

Un estudio realizado por Sánchez-Marín et al., (2020) encontró que la experiencia del *escape room* tiene el potencial de incrementar emociones positivas, la motivación y el desarrollo de competencias específicas y transversales. Asimismo, estas prácticas permiten la inclusión de otros elementos asociados a los juegos de roles, mediante la asignación de personajes o funciones específicas para el desarrollo de una narrativa. Un ejemplo de esto se muestra en la investigación realizada por Karageorgiou et al., (2019), en la cual los participantes asumieron roles específicos para la aplicación de la metodología.

Escape room: definición, propósito y beneficios

El *escape room* es un juego inmersivo e interactivo que consiste en escapar de una sala a través de desafíos narrativos que incluyen rompecabezas, tareas, acertijos y un límite de tiempo, entre otros elementos. Usualmente se realiza en grupos, entre 2 y 8 personas,

quienes deben resolver diferentes enigmas o acertijos para escapar de una situación ficticia. Para superar con éxito cada desafío, es necesario contar con diversas habilidades (Cohen et al., 2020; Grande-de-Prado et al., 2020; Sánchez-Martín et al., 2020). En las habilidades sociales se destaca el trabajo colaborativo, puesto que favorece el desarrollo de competencias como la resolución de problemas, el liderazgo, la comunicación y la confianza entre los miembros del equipo (Cohen et al., 2020).

Su origen es diverso y poco claro. Actividades como los parques temáticos, las películas de misterio y aventura, por ejemplo, *Sherlock Holmes* o *Indiana Jones*, así como los videojuegos, han influido en el desarrollo de los *escape rooms* (Cohen et al., 2020; Grande-de-Prado et al., 2020). En 2007, en Japón, se creó el primer *escape room* presencial (SCRAP, 2007); que posteriormente se extendió a Asia, Europa, Australia y América del Norte (Sánchez-Martín et al., 2020).

El éxito de esta metodología depende de diversos factores, desde el diseño, hasta su implementación. Un aspecto importante en el diseño es la narrativa: los estudios describen varias temáticas como el asesinato de un doctor, el fin del mundo o un situaciones fantásticas y catastróficas (Sánchez-Martín et al., 2020). Esta narrativa debe estar acompañada de una temática definida que potencie la inmersión, para lo cual se deben establecer las características del entorno y la ubicación de los elementos. Adicionalmente, suelen incluirse rompecabezas, acertijos y desafíos, cuya selección depende del investigador y de los objetivos de la práctica (Cohen et al., 2020).

Como se ha mencionado, el *escape room* presenta múltiples beneficios. No obstante, también presenta algunas limitaciones, como la duración del juego, dado que tiene la posibilidad que las tareas no sean completadas por falta de tiempo; el restablecimiento de la habitación, ya que hay que asegurarse que en el transcurso del juego no se muevan los objetos que se van a necesitar en los siguientes niveles; la posibilidad de realizar unas evaluaciones erróneas, o las restricciones de recursos disponibles, entre otras (Grande-de-Prado et al., 2020).

Si bien los *escape rooms* se encuentran en auge, es una metodología relativamente reciente que ha cobrado relevancia en áreas como la salud, las ciencias naturales, el periodismo y la tecnología en la educación superior. En esta última, su crecimiento puede atribuirse al vínculo de los docentes con la investigación, lo que les permite mantenerse

actualizados sobre nuevas metodologías de aprendizaje y los incentiva a aplicar el plan de trabajo a través de prácticas innovadoras y divertidas que aumenten la motivación y el aprendizaje de los estudiantes (Grande-de-Prado et al., 2020). En este orden de ideas, el trabajo docente implica continuamente prácticas de innovación educativa (Pinzón-Salazar, et al., 2025).

***Escape rooms* y talento humano**

El talento humano constituye un factor esencial para el éxito organizacional; en consecuencia, las áreas encargadas de su gestión se han consolidado como una de las más estratégicas y relevantes dentro de las empresas (Pérez Ferreira et al., 2021). Una de sus responsabilidades es facilitar herramientas para el desarrollo de los trabajadores y de esta manera, dar cumplimiento a los objetivos organizacionales (Matabajoy-Montilla et al., 2017). Precisamente, una reciente revisión de la literatura (Quiroz-González, et al., 2025) muestra cómo las metodologías activas son cada vez más implementadas y efectivas para el desarrollo del talento humano.

Concretamente, el *escape room* ha mostrado múltiples beneficios para el desarrollo del talento humano (Cohen et al., 2020). A continuación, se presentan algunos estudios que han evaluado el uso del *escape room* en contextos laborales (Tabla 1).

Tabla 1

Escape Room y Talento Humano

Nombre del estudio	Año	Participantes	Hallazgos
Trabajo en equipo a través del programa de entrenamiento basado en TeamSTEPPS® mediante una experiencia de <i>escape room</i> : una investigación mixta	2025	55 profesionales de enfermería	Se desarrollaron habilidades para el trabajo en equipo, comunicación y fomento de la cultura de seguridad del paciente.
Co-Design of an	2025	11 profesionales	Aumentó la motivación y la

<i>Escape Room</i> for e-Mental Health Training of Mental Health Care Professionals: Research Through Design Study		de la salud mental	disposición para participar en la intervención y estar abiertos al cambio.
Out-BREAK!: An IDWeek 2023 <i>Escape Room</i> to Break Out of the Educational Mold	2024	201 profesionales de la salud	Se utilizó con fines educativos para el aprendizaje en enfermedades infecciosas. Los participantes resaltaron la adquisición de conocimiento a través de esta estrategia.
Real-world and game-based learning to enhance decision-making	2024	66 estudiantes de postgrado en enfermería	Permitió adquirir habilidades necesarias para los entornos laborales como lo es la toma de decisiones en situaciones conflictivas y en escenarios clínicos. Además, fomentó el trabajo en equipo y la motivación para seguir aprendiendo.
<i>Escape Room</i> as a Sensitization and Education Strategy about Pressure Injury Prevention	2022	82 profesionales de enfermería	Generó sensibilización respecto a la importancia de aplicar recomendaciones para la prevención de lesiones por presión.
Design and Development of an <i>Escape Game</i> as a Knowledge Transfer Tool in Preparation for an Accreditation Visit in a Health Care Facility	2022	200 profesionales de enfermería	Se encontraron altas puntuaciones de satisfacción frente al <i>escape room</i> que fue diseñado con el objetivo de enseñar prácticas organizacionales que se requerían para la acreditación. No obstante, no se realizó una evaluación de la retención del conocimiento y los participantes que no completaron la misión (46%), no identificaron la relevancia para su práctica profesional ni que fuese un método efectivo de comunicación.
Advancing team cohesion: Using an <i>escape room</i> as a	2021	280 profesionales de la salud	Esta intervención mostró que el <i>escape room</i> es útil para obtener una mayor cohesión grupal.

novel approach

<i>Escape Room</i> Blueprint: Central Orientation Contagion Crisis	2021	23 profesionales de enfermería	Se logró mejorar la comunicación y la autoeficacia en las habilidades clínicas.
<i>Escape room</i> recruitment event: Description and lessons learned	2018	No especificado	Mostró ser una estrategia valiosa para el reclutamiento de estudiantes de enfermería, pues varios mencionaron que el <i>escape</i> <i>room</i> fomentó el deseo de querer estudiar esta carrera.

Respecto a los estudios presentados, se encuentra que la duración mínima de cada *escape room* fue de 17 minutos y la máxima de 60 minutos. En cuanto a la muestra, esta varió en cada investigación, siendo 11 el número mínimo de participantes y 280 el máximo reportado.

Por su parte, la población donde más se evidencia la aplicación del *escape room* en el ámbito organizacional es en el sector de la salud, con España, Estados Unidos, Brasil y Canadá como los países que más investigaciones han realizado al respecto. En el ámbito empresarial, se observa un balance en la implementación de *escape rooms* orientados a fortalecer el trabajo en equipo y la comunicación, así como habilidades técnicas en el campo clínico.

Algunas de las principales limitaciones mencionadas en las investigaciones se relacionan con el tiempo necesario para la preparación e implementación, la infraestructura requerida, los costos para su ejecución y la replicación de prototipos de este tipo de intervención. Un aspecto por resaltar es que la mayoría de los estudios evalúan el grado de satisfacción de los participantes con la experiencia; sin embargo, no se evidencia el uso de cuestionarios para examinar la adquisición o retención del conocimiento.

Además, se identifica que la mayoría de las intervenciones se llevan a cabo desde la presencialidad. Un estudio realizado por Bayrak & Liman-Kaban, (2024) señala que la intención de implementar estas metodologías en entornos virtuales está relacionada con los

conocimientos informáticos disponibles, por tanto, una escasa formación en esto interfiere en la creación de nuevos contenidos digitales (Sáez-López et al., 2022).

Finalmente, se detecta que la mayoría de los participantes que pasan por el *escape room*, refieren haber disfrutado la práctica y la perciben como una herramienta útil y valiosa para potenciar el aprendizaje en habilidades clínicas, en comunicación, trabajo en equipo, liderazgo y resolución de conflictos. Lo anterior, evidencia la efectividad de estas intervenciones en contextos organizacionales. En este sentido, el estudio realizado por Arrogante et al., (2025) mostró que los trabajadores preferían este tipo de experiencias para aprender habilidades frente a una conferencia formal o una presentación en PowerPoint, lo invita a seguir aplicando esta metodología en el ámbito empresarial.

CONCLUSIONES

Los *escape rooms* han demostrado ser una herramienta útil para hacer frente a los desafíos en términos de aprendizaje organizacional. Esta metodología ha sido principalmente aplicada en contextos educativos y empresariales.

Una de las razones por las que posiblemente se emplee con mayor frecuencia en contextos educativos es la familiaridad que tienen los docentes con metodologías emergentes de aprendizaje (Grande-de-Prado et al., 2020), un aspecto que puede ser menos visible en entornos empresariales. En esta misma línea, el acceso a una población estudiantil puede ser más viable, así como el tiempo con el que se puede contar para la implementación (30-60 min), factores que suelen estar más limitados en el entorno empresarial.

Diversos estudios sugieren los beneficios del uso del *escape room*, pero esta sigue siendo una metodología en proceso de exploración. Por tanto, futuras investigaciones podrían orientarse a construir una estructura metodológica clara para la aplicación de *escape rooms* en sectores empresariales. Asimismo, aunque existen estudios que integran la gamificación con los *escape rooms*, se observa un vacío teórico en su implementación, ya que en muchos casos no se incluyen elementos propios del juego, como niveles, puntos o insignias, los cuales son claves para la gamificación.

En esta misma línea, se hace evidente la necesidad de diseñar *escape rooms* que respondan a las necesidades de cada contexto, es decir, experiencias contextualizadas,

alineadas con los objetivos estratégicos y la cultura organizacional. También es importante llevar a cabo una prueba piloto que permita identificar oportunidades de mejora en las narrativas, tiempos de ejecución y la dinámica propia del juego. Así mismo, es fundamental fortalecer la evaluación de impacto a través de instrumentos que midan la satisfacción, el aprendizaje y la transferencia del conocimiento al entorno laboral. Una vía para enfrentar estos desafíos es el trabajo articulado que debe desarrollarse entre academia (investigadores) y empresa (líderes empresariales).

En las organizaciones, las áreas de talento humano tienen la responsabilidad de liderar la incorporación y apropiación de estas nuevas metodologías, actuando como promotores de la innovación pedagógica. Estas áreas están llamadas a mantenerse en actualización de forma permanente, con el fin de facilitar los procesos de enseñanza-aprendizaje que respondan a las exigencias cambiantes del entorno laboral.

Finalmente, se recomienda el apoyo de la inteligencia artificial para facilitar el diseño y la aplicación de escape *rooms*. En coherencia con lo anterior, un estudio realizado por Rodríguez-Rivera et al. (2025) evidencia que el uso de estas herramientas optimiza el tiempo de diseño y mejora la narrativa de las dinámicas creadas, puesto que propone herramientas prácticas con un orden lógico que facilitan la organización y progresión del juego.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abril, C., Gimenez-Fernandez, E. M., & Camacho-Miñano, M. (2024). Using gamification to overcome innovation process challenges: A literature review and future agenda. *Technovation*, *133*(November 2021), 103020. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.103020>
- Agudelo-Orrego, B. (2019). Formación del talento humano y la estrategia organizacional en empresas de Colombia. *Entramado*, *15*(1), 116–137. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5383>
- Aibar-Almazán, A., Castellote-Caballero, Y., Carcelén-Fraile, M. del C., Rivas-Campo, Y., & González-Martín, A. M. (2024). Gamification in the classroom: Kahoot! As a tool for university teaching innovation. *Frontiers in Psychology*, *15*(March), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1370084>
- Arrogante, O., Raurell-Torredà, M., Maestre-González, E., Sánchez-Chillón, F. J., Torralba-Melero, M., Aliberch-Raurell, A. M., Rojo-Rojo, A., & Zaragoza-García, I. (2025). Trabajo en equipo a través del programa de entrenamiento basado en TeamSTEPPS® mediante una experiencia de escape room: una investigación mixta. *Enfermería Intensiva*, *36*(2), 500536. <https://doi.org/10.1016/j.enfi.2025.500536>
- Arufe Giráldez, V., Sanmiguel-Rodríguez, A., Ramos Álvarez, O., & Navarro-Patón, R. (2022). Can Gamification Influence the Academic Performance of Students? *Sustainability*, *14*(9), 5115. <https://doi.org/10.3390/su14095115>
- Bayrak, C., & Liman-Kaban, A. (2024). Understanding the adoption and usage of gamified web tools by K-12 teachers in Turkey: A structural equation model. *Education and Information Technologies*. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12825-6>
- Bierbooms, J. J. P. A., Sluis-Thiescheffer, W. R. J. W., Feijt, M. A., & Bongers, I. M. B. (2025). Co-Design of an Escape Room for e-Mental Health Training of Mental Health Care Professionals: Research Through Design Study. *JMIR Formative Research*, *9*. <https://doi.org/10.2196/58650>
- Chabrier, A., Difabrizio, A., Parisien, G., Atkinson, S., & Bussières, J.-F. (2022). Design and Development of an Escape Game as a Knowledge Transfer Tool in Preparation for an Accreditation Visit in a Health Care Facility. *Canadian Journal of Hospital Pharmacy*, *75*(4), 251–258. <https://doi.org/10.4212/cjhp.3163>
- Chacón-Chacón, D. P., Estrella-Hidalgo, E. M., & Vergel-Parejo, E. E. (2024).

Estrategias didácticas basadas en metodologías activas para potenciar el aprendizaje significativo de las ciencias naturales en educación básica. *Revista Mexicana de Investigación e Intervención Educativa*, 3(3), 26–40.
<https://doi.org/10.62697/rmiie.v3i3.104>

Cohen, T. N., Griggs, A. C., Kanji, F. F., Cohen, K. A., Lazzara, E. H., Keebler, J. R., & Gewertz, B. L. (2021). Advancing team cohesion: Using an escape room as a novel approach. *Journal of Patient Safety and Risk Management*, 26(3), 126–134.
<https://doi.org/10.1177/25160435211005934>

Cohen, T. N., Griggs, A. C., Keebler, J. R., Lazzara, E. H., Doherty, S. M., Kanji, F. F., & Gewertz, B. L. (2020). Using Escape Rooms for Conducting Team Research: Understanding Development, Considerations, and Challenges. *Simulation and Gaming*, 51(4), 443–460. <https://doi.org/10.1177/1046878120907943>

Connelly, L., Burbach, B. E., Kennedy, C., & Walters, L. (2018). Escape room recruitment event: Description and lessons learned. *Journal of Nursing Education*, 57(3), 184–187. <https://doi.org/10.3928/01484834-20180221-12>

Fernandes, C. S., Moreira, M. T., Ferreira, M. S., Funghetto, S. S., Stival, M. M., & Lima, A. M. N. (2025). Exploring the use of escape rooms in nursing: A comprehensive scoping review. *Nurse Education in Practice*, 84(March).
<https://doi.org/10.1016/j.nepr.2025.104324>

Gerdenitsch, C., Sellitsch, D., Besser, M., Burger, S., Stegmann, C., Tscheligi, M., & Kriglstein, S. (2020). Work gamification: Effects on enjoyment, productivity and the role of leadership. *Electronic Commerce Research and Applications*, 43(1009943). <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2020.100994>

Ghezzi, J. F. S. A., Higa, E. de F. R., Lemes, M. A., & Marin, M. J. S. (2021). Strategies of active learning methodologies in nursing education: an integrative literature review. *Revista Brasileira de Enfermagem*, 74(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1590/0034-7167-2020-0130>

Gómez-Gómez, M. (2023). La innovación y la tecnología como elementos claves en el contexto de educación superior. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, 69. <https://doi.org/10.35575/rvucn.n69a1>

Grande-de-Prado, M., García-Martín, S., Baelo, R., & Abella-García, V. (2020). Edu-Escape Rooms. *Encyclopedia*, 1(1), 12–19.
<https://doi.org/10.3390/encyclopedia1010004>

Karageorgiou, Z., Mavrommati, E., & Fotaris, P. (2019). Escape room design as a game-

based learning process for steam education. *Proceedings of the European Conference on Games-Based Learning, 2019-October*.
<https://doi.org/10.34190/GBL.19.190>

Marlés Betancourt, C., Peña Torres, P., & Pardo Roza, Y. Y. (2024). Gamificación como estrategia para incluir la educación ambiental en el contexto universitario: caso REHI. *Revista Científica*, 49(1), 13–27. <https://doi.org/10.14483/23448350.21196>

Matabajoy-Montilla, J. M., Matabachoy-Tulcán, S. M., & Obando-Guerrero, L. M. (2017). Procesos de desarrollo del talento humano en una clínica de especialidades de Pasto, Colombia. *Universidad y Salud*, 20(1), 26.
<https://doi.org/10.22267/rus.182001.106>

McLaughlin, J. L., Reed, J. A., Shiveley, J., & Lee, S. (2021). Escape Room Blueprint: Central Orientation Contagion Crisis. *Simulation & Gaming*, 52(1), 24–30.
<https://doi.org/10.1177/1046878120954493>

Özkan Şat, S., Aktaş, N., & Akbaş, P. (2025). The impact of escape room game and role-playing on nursing students' violence against women assessment skills and attitudes toward violence against women: A randomised controlled trial. *Nurse Education in Practice*, 84, 104346. <https://doi.org/10.1016/j.nepr.2025.104346>

Pérez Ferreira, I. C., Castellanos Flórez, M. M., & Alvarez-Melgarejo, M. (2021). La gestión del talento humano a través de un ejercicio lúdico gamificado. *I+D Revista de Investigaciones*, 16(1), 101–111. <https://orcid.org/0000-0003->

Pinzón-Salazar, S., Pulgarín-Arias, L., Ospina-Cano, S. y Quiroz-González, E. (2025). Instrumento para la evaluación de conocimientos, actitudes y prácticas de docentes sobre gamificación (CAP-GD): análisis de propiedades psicométricas. *European Public y Social Innovation Review*, 10, 1-22.
<https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1341>

Quiroz-González, E., Cataño, M., Muñoz, T., Pulgarin, L. & Pinzón-Salazar, S. (2021). Diseño de una lúdica en comunicación positiva como herramienta de capacitación en las organizaciones. *Entre Ciencia E Ingeniería*, 15(29), 46-53.
<https://doi.org/10.31908/19098367.2657>

Quiroz-González, E., Morales Grajales, D., Ospina-Cano, S. & Pinzón-Salazar, S. (2025). Inteligencia emocional en estudiantes universitarios de fase profesional: Diseño, validación y aplicación de una práctica gamificada. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (74), 161-193.
<https://www.doi.org/10.35575/rvucn.n74a7>

- Quiroz-González, E., Salazar, C., Silva, S. & Pinzón-Salazar, S. (2025). El rol de las metodologías activas de aprendizaje en el desarrollo de recursos en los trabajadores. En *Visiones del futuro. Avances en ciencia, derecho y tecnología*. (pp. 131-158). Editorial EIDEC. <http://doi.org/10.34893/p9931-5577-1120-m>
- Ramalho, A., Camargo, J., Mazócoli, E., Barbosa, C., Prado, N., & Marin, A. (2022). Scape Room as a Sensitization and Education Strategy about Pressure Injury Prevention. *ESTIMA, Brazilian Journal of Enterostomal Therapy*, 1–8. https://doi.org/10.30886/estima.v20.1211_IN
- Reigada, C., Sandgren, A., Rivas, S., Carvajal, A., Hermida-Romero, S., Benítez, E., Ripoll, G., Olza, I., Centeno, C., & Gómez, B. (2023). Palliative care stay room – designing, testing and evaluating a gamified social intervention to enhance palliative care awareness. *BMC Palliative Care*, 22(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s12904-023-01166-9>
- Rodríguez-Rivera, P., Rodríguez-Ferrer, J. M., & Manzano-León, A. (2025). Designing Digital Escape Rooms with Generative AI in University Contexts: A Qualitative Study. *Multimodal Technologies and Interaction*, 9(3), 1–19. <https://doi.org/10.3390/mti9030020>
- Sáez-López, J. M., Vázquez-Cano, E., Fombona Cadavieco, J., & López-Meneses, E. (2022). Gamification and gaming proposals, teachers' perceptions and practices in Primary Education. *Interaction Design and Architecture(S)*, 53, 213–229. <https://doi.org/10.55612/s-5002-053-011>
- Sánchez-Martín, J., Corrales-Serrano, M., Luque-Sendra, A., & Zamora-Polo, F. (2020). Exit for success. Gamifying science and technology for university students using escape-room. A preliminary approach. *Helijon*, 6(7). <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2020.e04340>
- Santana, A., & de Deus, R. (2020). Active Learning Methodologies and Industry 4.0 skills development-A Systematic Review of the Literature. *Proceedings of the 15th Latin American Conference on Learning Technologies, LACLO 2020*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/LACLO50806.2020.9381161>
- SCRAP. (2007). Real Escape Game project first series. SCRAP. <https://bit.ly/452GCsQ>
- Vázquez-Calatayud, M., García-García, R., Regaira-Martínez, E., & Gómez-Urquiza, J. (2024). Real-world and game-based learning to enhance decision-making. *Nurse Education Today*, 140(May), 106276. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2024.106276>
- Wibisono, G., Setiawan, Y., Aprianda, B., & Cendana, W. (2023). Understanding the

effects of gamification on work engagement: The role of basic need satisfaction and enjoyment among millennials. *Cogent Business and Management*, 10(3).
<https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2287586>

Zhong, D., Dong, S. W., Chu, V. T., Gabriel, N., Lusardi, K., Searns, J. B., Wattier, R. L., Ristagno, E. H., Bhimraj, A., Boguniewicz, J., & Pottinger, P. (2024). Out-BREAK!: An IDWeek 2023 Escape Room to Break Out of the Educational Mold. *Open Forum Infectious Diseases*, 11(10), 1–11.
<https://doi.org/10.1093/ofid/ofae558>

GESTIÓN FINANCIERA EN PYMES PERUANAS: APROXIMACIÓN TEÓRICA Y ANTECEDENTES INTERNACIONALES⁴⁴

FINANCIAL MANAGEMENT IN PERUVIAN SMES: THEORETICAL APPROACH AND INTERNATIONAL BACKGROUND

Ricardo Villena Presentacion⁴⁵

César Hildebrando Chávez Calderón⁴⁶

Miguel Antonio Riojas Cieza⁴⁷

Alberto Barrenechea Romero⁴⁸

Heydrich Didier Gutierrez Alamo⁴⁹

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.⁵⁰

⁴⁴ Derivado del proyecto de investigación: Gestión financiera en Pymes Peruanas: Aproximación teórica y antecedentes internacionales

⁴⁵ Ingeniero Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Master en Administración de Negocios, Universidad de Lima, Docente universitario, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, correo electrónico: rvillenap@unmsm.edu.pe

⁴⁶ Licenciado en Administración con mención en Salud, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Maestro en Administración Estratégica de Empresas, Universidad Nacional del Centro del Perú, Docente universitario, Universidad Nacional Federico Villarreal, correo electrónico: cchavezcal@unfv.edu.pe

⁴⁷ Licenciado en Administración, USMP. Maestro en Gestión de Alta Dirección, UNFV; Docente universitario UNFV, email: mriojas@unfv.edu.pe

⁴⁸ Alberto Barrenechea Romero Licenciado en Administración, Maestría en Administración, docente universitario, abarrenechea@unfv.edu.pe

⁴⁹ Ingeniero Pesquero Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Maestro en Seguridad Industrial y Protección Ambiental, Universidad Nacional Federico Villarreal, Docente Universidad Nacional Mayor de San Marcos., correo electrónico hgutierrez@unmsm.edu.pe

⁵⁰ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) son organizaciones vulnerables pero importantes para la sociedad, debido a que contribuyen al desarrollo económico y social en su zona de influencia. Sin embargo, enfrentan limitaciones críticas como el acceso al financiamiento, una baja capacidad para el empleo de normas contables en especial las Normas Internacional de Información Financiera (NIIF), falta de personal capacitado, Gerencia no preparada para enfrentar los desafíos de mercados volátiles, falta de infraestructura y su gestión informal. Estas limitaciones inciden en la sostenibilidad y en el desarrollo de estas organizaciones

El objetivo de este trabajo de investigación es identificar mediante la revisión de literatura como las dimensiones: calidad, eficiencia, costos, inventarios y finanzas quienes inciden en la sostenibilidad de estas organizaciones. La metodología es cualitativa de tipo documental que es sustentado en la revisión de artículos indexados en bases de datos como Scopus, Redalyc, Scielo y Google Académico. En los resultados de la revisión se señala que los indicadores inciden en la sostenibilidad y la rentabilidad de estas organizaciones. Asimismo, se resalta que la adopción de las normas NIIF mejora la transparencia contable que facilitan el acceso al crédito. Se concluye que la gestión integral de estos indicadores es fundamental para la competitividad y la sostenibilidad y que la presente investigación constituye una base para futuros estudios de naturaleza cuantitativa.

PALABRAS CLAVE: Pequeñas y medianas empresas (PYMES), Financiación empresarial, Normas Internacionales de Información Financiera.

ABSTRACT

Small and medium-sized enterprises (SMEs) are vulnerable but important organizations for society, because they contribute to economic and social development in their area of influence. However, they face critical limitations such as access to financing, a low capacity to use accounting standards, especially International Financial Reporting Standards (IFRS), lack of trained personnel, management not prepared to face the challenges of volatile markets, lack of infrastructure and informal management. These limitations have an impact on the sustainability and development of these organizations

The objective of this research work is to identify, through a literature review, the dimensions: quality, efficiency, costs, inventories and finances that affect the sustainability of these organizations. The methodology is qualitative of a documentary type that is supported by the review of articles indexed in databases such as Scopus, Redalyc, Scielo and Google Scholar. The results of the review indicate that the indicators have an impact on the sustainability and profitability of these organizations. It is also highlighted that the adoption of IFRS standards improves accounting transparency that facilitates access to credit. It is concluded that the comprehensive management of these indicators is fundamental for competitiveness and sustainability and that this research constitutes a basis for future quantitative studies.

Keywords: Small and medium-sized enterprises (SMEs), Business finance, International Financial Reporting Standards

INTRODUCCIÓN

Las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) se distinguen, sobre todo, por dos factores: el número de trabajadores y su aporte productivo. Estos criterios les dan un perfil propio dentro del mercado. En la literatura se señala que las PYMES incluyen entre 10 y 99 trabajadores. Dentro de este grupo, las pequeñas reúnen de 10 a 49 personas, mientras que las medianas abarcan de 50 a 99 (Villena Presentación & Garcia Janampa, 2025).

En la mayoría de los casos, el emprendedor no solo impulsa el negocio, sino que también lo dirige y asume el rol de propietario. Estas organizaciones suelen contar con personal poco especializado y con dificultades de acceso al financiamiento (Ma et al., 2019). Aun con esas limitaciones, tienen un valor social importante como su cercanía con las comunidades locales y debido a ello, contribuyen al desarrollo, generan bienestar social y fortalecen la economía. Por lo mismo, es clave reconocer su aporte y lo aprovechen para ganar competitividad (Villena et al., 2024)

La fragilidad es evidente. Muchas PYMEs cierran por problemas de gestión. La falta de experiencia en la administración de recursos y la mala planificación presupuestal son factores críticos que aumentan su vulnerabilidad. A pesar de todo, siguen ocupando un rol central en la economía nacional. No solo crean empleo y riqueza, sino que también sostienen las interacciones sociales y económicas (Hoelscher & Garcia, 2024)

208

1. Introducción.

Las finanzas las PYMES es un tema recurrente en la investigación académica. A nivel internacional hay múltiples aportes. por ejemplo, (Detarsio, 2023) investigaron que las PYMES en Argentina, tomando en cuenta factores demográficos y características propias, por ejemplo: el volumen de las ventas permite acceder al crédito, al flujo de efectivo y al manejo de caja. En ese mismo trabajo se advierte que las tasas de interés y el endeudamiento modifican su desempeño, lo que obliga a usar mejores herramientas de gestión.

Rengel (2020) entrevistaron a empresarios de las PYMES manufactureras. El resultado de la investigación fue identificar que la innovación sostiene el posicionamiento financiero de sus organizaciones y la falta de propuestas novedosas debilita la competitividad. En cambio, quienes sí innovan pueden garantizar su sostenibilidad

Canossa-Montes de Oca & Rodríguez-Alcocer (2019) indican que las PYMEs deben integrar las finanzas en sus procesos productivos. En su investigación encontraron que un 94% del financiamiento proviene de recursos propios y solo un 6% de préstamos bancarios. El dato refleja un problema: la dificultad para acceder al crédito. Por eso recomiendan simplificar trámites y buscar asesoría profesional para invertir con eficacia.

En Portugal, Correa & Figueroa (2019) analizaron las PYMEs con inversiones extranjeras directas. Observaron que dependen en gran parte de sus fondos propios. Aunque todavía ha deficiencias en el mercado, no hallaron diferencias notorias entre las barreras de financiamiento de inversiones nacionales y extranjeras.

En México, Flores (2020) estudiaron opciones como fintech y crowdfunding en las PYMES. Según su análisis, ofrecen mayor acceso y tasas competitivas, pero con riesgos: la posibilidad de no completar el financiamiento a tiempo y la exposición pública de los proyectos.

En Perú, Villena et al., (2024) señalan que las PYMEs son esenciales en el desarrollo económico, pero muchas no acceden al crédito formal y recurren a mecanismos informales. Analiza también la aplicación de las Normas Internacionales de Información Financiera (NIIF). Entre las ventajas menciona una gestión más organizada y transparente.

Las PYMES en el Perú enfrentan diferentes desafíos en el financiamiento formal lo que imposibilita el crecimiento, innovación y sostenibilidad. Adicionalmente, se observa la necesidad de implementar normas de información financieras como un medio para garantizar la transparencia e idoneidad de la información, aunque las barreras educativas imposibilitan su correcta implementación. Por tanto, las PYMES requieren superar diferentes barreras que originan limitaciones en la adopción de normas contables que garanticen la transparencia de los datos registrados. (Baker & Kaur, 2020)

La pregunta de investigación está relacionada en ¿Cómo se relacionan los indicadores de calidad, financiera, inventarios en el performance financiero en un entorno incierto y con dificultades financieras?

Objetivo General

Analizar mediante los antecedentes teóricos y documentales como los indicadores de calidad, eficiencia, costos, inventarios se vinculan en el desempeño financiero en las PYMES, considerando como problemática el acceso de financiamiento la necesidad de aplicar NIIF

2. Marco Teórico

Las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) se distinguen, sobre todo, por dos factores: el número de trabajadores y su aporte productivo. Estos criterios les dan un perfil propio dentro del mercado. En la literatura se señala que las MYPEs incluyen entre 10 y 99 trabajadores. Dentro de este grupo, las pequeñas reúnen de 10 a 49 personas, mientras que las medianas abarcan de 50 a 99.(Cañete, 2020)

En la mayoría de los casos, el emprendedor no solo impulsa el negocio, sino que también lo dirige y asume el rol de propietario. Estas organizaciones suelen contar con personal poco especializado y con dificultades de acceso al financiamiento (Rao et al., 2021). Aun con esas limitaciones, tienen un valor social innegable: su cercanía con las comunidades locales. Gracias a ello, contribuyen al desarrollo, generan bienestar social y fortalecen la economía. Por lo mismo, es clave que reconozcan su aporte y lo aprovechen para ganar competitividad (Clauss et al., 2022)

Ahora bien, su fragilidad es evidente. Muchas PYMEs desaparecen por problemas de gestión. La falta de experiencia en la administración de recursos y la mala planificación presupuestal son factores críticos que aumentan su vulnerabilidad (Cardoza et al., 2016)

A pesar de todo, siguen ocupando un rol central en la economía nacional. No solo crean empleo y riqueza, sino que también sostienen dinámicas sociales. Es frecuente que sean empresas familiares y que, en algunos casos, la dirección se herede de una generación a otra, manteniendo vivo el proyecto empresarial en el tiempo.(Castro & Moreira, 2024)

210

MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación tiene un enfoque cualitativo de tipo documental, orientado a analizar la literatura de artículos científicos relacionado a PYMES y su aplicación en la NIIF que garanticen la transparencia de los datos

Diseño del estudio.

La investigación se basa en revisión de literatura cuyo aporte más importante están relacionados con cinco dimensiones claves como calidad, eficiencia, costos, inventarios y finanzas que fueron identificadas de literatura previa.

Los artículos fueron seleccionados de base de datos como scopus, Redalyc, Scielo, y Google académico y tesis universitarias hasta el año 2025

Procedimiento

1. búsqueda y selección de artículos mediante palabras claves (PYMES, Gestión Financiera, NIIF.
2. Clasificación: Organización de los artículos basado en las palabras claves y que cumplan criterios de rigurosidad académica.
3. Análisis temático: Agrupación en torno a las dimensiones como calidad, eficiencia y finanzas, con la finalidad de identificar patrones en el comportamiento de las PYMES

RESULTADOS

Los resultados obtenidos permitieron organizar la información en dimensiones claves los cuales inciden en el desempeño financiero de las PYMES. Cada indicador es explicado mediante aportes teóricos y empíricos lo cual permite comprender la relación entre la gestión interna de las pymes y su desempeño económico.

Calidad de producto: Respecto a este indicador, tiene un efecto positivo en lo que es la rentabilidad de las empresas y en su desempeño financiero. Pero es sabido que hay empresas que luego de poner en práctica las estrategias de calidad, estas no logran el objetivo de impactar con resultados positivos las finanzas en las empresas aplicadas y esto las lleva, en situaciones extremas, a desaparecer del mercado. Es importante analizar en el sector empresarial la manera en que la calidad impacta a la rentabilidad de la empresa (Qiu et al., 2023)

Calidad del servicio: La calidad del servicio o productos que ofrece una empresa se basa en la estrategia, a su vez está regida por diversos criterios de evaluación por parte de los que perciben el servicio. Pero nos indican que para obtener un resultado óptimo basado en las estructuras y el desarrollo de la empresa el cual fue observado y analizado por los clientes, se requiere estructurar y afianzar el compromiso con la calidad del servicio a brindar. (Qamar et al., 2020)

Eficiencia de operaciones: Es el claro ejemplo de cómo se maneja una empresa, donde el conjunto de prácticas que tengan como resultado reducir las fallas de producción y servicio con el objetivo de utilizar los recursos mínimos para entregar los productos eso se da con el seguimiento y la lista de procesos ((Qamar et al., 2020)

Control de Costos: Toda empresa necesita un implemento del sistema de gestión de costos debido a que permite la determinación de costos de la producción de bienes y servicios, para una buena decisión y poder fijar el precio de venta logre la competencia en el mercado. Los tres objetivos: 1. Cálculo de los costos de productos y servicios; 2) Control de gestión 3) Análisis económico y toma de decisiones. (Janica, 2020)

Costo de almacenamiento: Es importante para una empresa estimar la cantidad precisa que va a vender en el mercado para no tener stock en exceso. La función que realiza este indicador se concentra en calcular el costo de almacenamiento del producto (teniendo en cuenta estos 2 factores: peso y volumen). además, se concluyó que la contabilidad tradicional no es capaz de completar las expectativas de los sistemas empresariales actuales porque es obligatoriamente necesario el estudio y conocimiento de los costos asociados a los procesos de la Cadena de Suministro para un mejor negocio. (Insawan et al., 2022)

Costo de transporte: Los costos de transporte son importantes en la logística de la empresa, ya que en esta época se presencia el gran crecimiento de compras a través de internet en tiendas online, entonces se añade la importancia en la entrega de productos a los clientes y es por ello la necesidad de gestionar la distribución de los productos de manera eficaz para que la empresa pueda lograr su desarrollo (de la Vega et al., 2020)

INVENTARIO

Gestión de stock en el almacén: Este indicador es de vital importancia para la mejor y mayor contabilidad de la empresa (Racking, A. R.,2021). Es utilizada para poder agrupar los datos e información que tenemos de la Pyme de manera ordenada. (Dimensiones contables. (s/f).) El stock en almacenamiento es importante porque evita la escasez de producto, menor coste unitario del producto y disponibilidad inmediata de cara a la demanda del cliente. (de la Vega et al., 2020)

Roturas de inventario: En cuestión de Pymes, los inventarios son de suma importancia para la valoración de lo que efectúa y como crece económicamente la empresa. A pesar de que las pymes no cuentan con una amplia cantidad de servidores y trabajadores para la

correcta identificación del potencial que estas presentan, presentan una perfecta estructuración organizacional en sus inventarios. (Panday et al., 2020)

Stock óptimo: Define la cantidad de productos que vende una empresa y de ahí se pide un inventario preciso para cumplir con la demanda y sin que se produzca una rotura de stock, con el fin de obtener máxima rentabilidad y reducir los costes de almacén. (Panday et al., 2020)

FINANZAS

Costo de producción: Son los costos que genera el proceso de transformar la materia prima en productos finales de una empresa para el inventario como materia directa, mano de obra, costos de fabricación, alquiler del lugar (Wang et al., 2025)

Inversión: La inversión en la capacitación del personal no se presenta en su gran mayoría de las pymes, esto se debe a diversas causas como la falta de conocimiento acerca de las contribuciones finales que aporta a la empresa, así como también el invertir en su capacitación y perder al personal que genera más valor, entre otros. En la investigación se concluye el impacto positivo de la inversión en capital humano y las ventas finales. (Wang et al., 2025)

Análisis financiero: Esta trata del análisis de las finanzas que se llevan a cabo dentro de una PYME's , cabe resaltar que tiene su impulso en la forma en la que desenvuelve periódicamente en la esta, no obstante, se mantiene como prioridad la evaluación de los factores de empeño que se le impone, así como una visión óptima y real que se refleja en la situación en que se encuentre (Wang et al., 2025)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis documental permite identificar el rol fundamental de las PYMES en la economía nacional, pero sin embargo enfrentan diferentes debilidades en el acceso de financiamiento y debilidades en la gestión contable financiera. La revisión también contribuye que la aplicación de las NIIF en la PYMES puede ayudar en la transparencia de los resultados y que pueda permitir o incrementar la posibilidad de financiamiento formal. Asimismo, permite identificar cinco dimensiones en el desempeño financiero como 1) Calidad del producto y del servicio 2) Eficiencia de las operaciones 3) Costos 4) Inventarios 5) Finanzas.

Se espera que futuras investigaciones: 1) Se midan de manera cuantitativa el efecto de las dimensiones en los resultados financieros en las PYMES 2) Desarrollar casos que permitan dar un contexto aplicado de tal manera que permitan identificar las barreras y los impulsores en a la gestión financiera de las PYMES. 3) Se compare con diferentes sectores.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Baker, O., & Kaur, P. (2020). The Adoption of Cloud Computing CRM in SME's, Southland, New Zealand. *2020 IEEE Conference on Open Systems, ICOS 2020*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICOS50156.2020.9293682>
- Cañete, N. (2020). Coronavirus: ¿Cómo apoyar desde el sector de fomento a la innovación y las pymes? *Bid*, 1.
- Canossa-Montes de Oca, H., & Rodríguez-Alcocer, R. (2019). Estrategias De Financiamiento, Un Reto Para Las Pymes Comerciales De Guanacaste. *InterSedes*, 20(42), 105–117. <https://doi.org/10.15517/isucr.v20i42.41845>
- Cardoza, G., Fornes, G., Farber, V., Gonzalez Duarte, R., & Ruiz Gutierrez, J. (2016). Barriers and public policies affecting the international expansion of Latin American SMEs: Evidence from Brazil, Colombia, and Peru. *Journal of Business Research*, 69(6), 2030–2039. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.10.148>
- Castro, R., & Moreira, A. C. (2024). Unveiling paradoxes: navigating SMEs readiness in the post-pandemic normality. *Cogent Business and Management*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2330114>
- Clauss, T., Breier, M., Kraus, S., Durst, S., & Mahto, R. V. (2022). Temporary business model innovation – SMEs' innovation response to the Covid-19 crisis. *R and D Management*, 52(2), 294–312. <https://doi.org/10.1111/radm.12498>
- Correa, R., & Figueroa, B. (2019). Plan De Negocio: Servicio Delivery Por Conveniencia “2Go.” *Repositorio Institución Pirhua*, 2, 15.
- de la Vega, M., Baez-Lopez, Y., Limon-Romero, J., Tlapa, D., Flores, D. L., Rodríguez Borbón, M. I., & Maldonado-Macías, A. A. (2020). Lean manufacturing critical success factors for the transportation equipment manufacturing industry in Mexico. *IEEE Access*, 8, 168534–168545. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023633>
- Detarsio, R. (2023). *SOBREVIVIR Y COMPETIR EN TIEMPOS DE CRISIS CASOS DE ESTRATEGIAS DE PYMES ARGENTINAS (*)*. www.dynamic-sme.org
- Flores. (2020). *La logística como ventaja competitiva en las Pymes de servicios en México*.
- Hoelscher, K., & Garcia, C. G. (2024). SMEs, violence and crisis: Stylized facts from a survey in Latin America. *World Development*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106720>

- Insawan, H., Abdulahanaa, Karyono, O., & Farida, I. (2022). THE COVID-19 PANDEMIC AND ITS IMPACT ON THE YIELDS OF SHARIA STOCK BUSINESS PORTFOLIO IN INDONESIA. *International Journal of Professional Business Review*, 7(6). <https://doi.org/10.26668/businessreview/2022.v7i6.e941>
- Janica, F. (2020). Internal Market Orientation's Relationship with Intrinsic Motivation and Perceived Service Quality. In *Pucp*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2660676>
- Ma, B., Zhou, Z., & Chen, X. (2019). Financing difficulties for SMEs and credit rationing—an expanded model of mortgage loans with asymmetric information. *Applied Economics*, 51(48), 5243–5257. <https://doi.org/10.1080/00036846.2019.1610721>
- Panday, R., Novita, W., Dewi Sri, W. P. G., Cahyadi, H., & Tutiek, Y. (2020). Cost and Quantity Inventory Analysis in the Garment Industry: A Case study. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(9), 2195–2203.
- Qamar, A., Hall, M. A., Chicksand, D., & Collinson, S. (2020). Quality and flexibility performance trade-offs between lean and agile manufacturing firms in the automotive industry. *Production Planning and Control*, 31(9), 723–738. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1681534>
- Qiu, Y., Xiao, C., & Li, J. (2023). Service quality evaluation of county-level public hospitals in Chongqing under smart healthcare. *BMC Health Services Research*. <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11976-z>
- Rao, P., Kumar, S., Chavan, M., & Lim, W. M. (2021). A systematic literature review on SME financing: Trends and future directions. *Journal of Small Business Management*, 00(00), 1–31. <https://doi.org/10.1080/00472778.2021.1955123>
- Rengel, J. (2020). *El impacto de la innovación y las finanzas en la competitividad de las PYMES manufacturera*. 11–34. <https://core.ac.uk/download/pdf/196615743.pdf>
- Villena Presentación, R., & Garcia Janampa, L. P. (2025). Capacidades dinámicas en PYMES para la gestión de crisis y el desempeño operacional. *Revista Venezolana de Gerencia*, 30(Especial 13), 233–248. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.30.especial13.15>
- Villena, R., Lujan Roger, & Andia, W. (2024). *Identification and prioritization of enablers for agile supply chains in SMEs in Peru , a quantitative approach Identificación y*

- priorización de facilitadores para cadenas de suministros ágiles en PYMES de Perú, un enfoque cuantitativo.* 1–7. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.362>
- Villena, R., Margarita, M., Velasquez, G., Paola, L., Janampa, G., Orlando, R., Ruiz, L., Valencia, W. A., Alvaro, R., Pancca, A., Adolfo, G., Cárdenas, M., Nacional, U., Villarreal, F., Nacional, U., San, M. De, Presentación, R. V., Margarita, M., Velasquez, G., ... Janampa, G. (2024). *Desafíos y Perspectivas en la Implementación de CRM en PYMES: Un Enfoque a través del Método de Casos en el Contexto Peruano.* 1–9. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.539>
- Wang, Z., McNally, R., Lenihan, H., & Li, C. (2025). Social capital as a barrier to innovation: The mediating role of job autonomy. *Finance Research Letters*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106530>

**ADOPCIÓN DEL SISTEMA
INTEGRADO DE REGISTROS
ELECTRÓNICOS Y EL
CUMPLIMIENTO TRIBUTARIO DE
LOS CONTRIBUYENTES⁵¹**

**ADOPTION OF THE INTEGRATED
ELECTRONIC RECORDS SYSTEM
AND TAXPAYERS' TAX COMPLIANCE**

218

Emma Zoraida Roman Cansaya⁵²

Jhoansson Victor Manuel Quilia Valerio⁵³

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES⁵⁴

⁵¹ Derivado del proyecto de investigación: Adopción del sistema integrado de registros electrónicos en el cumplimiento tributario de los contribuyentes del régimen MYPE de Collao, 2024.

⁵² Contadora Pública, Universidad César Vallejo, Contadora Independiente, correo electrónico: ezroman@ucvvirtual.edu.pe.

⁵³ Contador Público, Universidad César Vallejo, Maestro en Administración de Negocios MBA de la Universidad César Vallejo, Asesor de tesis de la Universidad César Vallejo y Universidad Tecnológica del Perú, correo electrónico: JQUILIAV@ucvvirtual.edu.pe.

⁵⁴ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

El presente trabajo analiza la influencia de la adopción del Sistema Integrado de Registros Electrónicos (SIRE) en el cumplimiento tributario de los contribuyentes del Régimen MYPE Tributario en la provincia de El Collao, Puno. El estudio se enmarca en una investigación aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental, transversal y de carácter correlacional. Para la recolección de información se empleó la técnica de encuesta, aplicándose un cuestionario de 24 ítems validado por expertos en la materia y con adecuada confiabilidad comprobada mediante la prueba Alfa de Cronbach. La muestra estuvo conformada por 35 contribuyentes seleccionados bajo un muestreo no probabilístico por conveniencia. Los datos obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva e inferencial, utilizando la prueba de Rho de Spearman para establecer la relación entre las variables. Los resultados demostraron la existencia de una asociación positiva de intensidad moderada entre la adopción del SIRE y el cumplimiento tributario, obteniéndose un coeficiente de 0.351 y un nivel de significancia de 0.019, inferior al umbral de 0.05. Estos hallazgos permiten aceptar la hipótesis alterna, confirmando que la implementación del SIRE incide de manera significativa en la mejora del cumplimiento de las obligaciones fiscales en las MYPE. En consecuencia, se evidencia que el uso del sistema electrónico contribuye al fortalecimiento de la formalización tributaria y a la eficiencia del sistema impositivo en la provincia de estudio.

PALABRAS CLAVE: Registros electrónicos, cumplimiento tributario, contribuyentes, formalización, MYPE.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of the adoption of the Integrated System of Electronic Records (SIRE) on tax compliance among taxpayers under the MYPE Tax Regime in the province of El Collao, Puno. The research was conducted with an applied approach, using a quantitative methodology and a non-experimental, cross-sectional, and correlational design. Data collection was carried out through a survey, applying a 24-item questionnaire validated by experts and demonstrating adequate reliability according to Cronbach's Alpha test. The sample consisted of 35 taxpayers selected through a non-probabilistic convenience method. The data were processed using descriptive and inferential statistics, applying Spearman's Rho correlation test to determine the association between variables. The findings revealed a positive and moderate relationship between SIRE adoption and tax compliance, with a correlation coefficient of 0.351 and a significance level of 0.019, lower than the 0.05 threshold. Based on these results, the alternative hypothesis was accepted, confirming that the use of SIRE significantly improves compliance with tax obligations within the MYPE regime. Consequently, it is demonstrated that the implementation of electronic record systems contributes to strengthening tax formalization and enhancing the efficiency of the tax system in the province under study.

Keywords: Electronic records, tax compliance, taxpayers, formalization, MYPE.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cumplimiento tributario de las micro y pequeñas empresas (MYPE) en el Perú ha sido un desafío recurrente debido a diversas barreras tecnológicas, operativas y normativas. En un esfuerzo por mejorar la transparencia fiscal y reducir la informalidad, la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT) ha implementado el Sistema Integrado de Registros Electrónicos (SIRE), una plataforma destinada a simplificar la generación del Registro de Compras Electrónico (RCE) y el Registro de Ventas e Ingresos Electrónico (RVIE) a partir de los comprobantes de pago electrónicos. No obstante, la adopción de esta herramienta ha enfrentado múltiples dificultades, particularmente entre los contribuyentes del Régimen MYPE Tributario (RMT), quienes presentan limitaciones en infraestructura digital, capacitación técnica y acceso a asesoría contable especializada (Quilia et al., 2023).

En la provincia de El Collao, región Puno, estas problemáticas se agravan debido a la conectividad inestable, frecuentes fallos en la plataforma de SUNAT y la complejidad normativa del sistema. Como resultado, diversos estudios señalan que los contribuyentes enfrentan dificultades para registrar oportunamente sus operaciones, lo que incrementa su exposición a sanciones tributarias, a la pérdida del crédito fiscal del Impuesto General a las Ventas (IGV) y, en algunos casos, fomenta el incumplimiento fiscal (Barja, 2023). En ese sentido, esta situación genera incertidumbre en la gestión tributaria y desalienta la formalización de negocios en sectores altamente vulnerables. A pesar de que el SIRE fue diseñado con el propósito de optimizar la gestión tributaria de los contribuyentes, su implementación en MYPE ha enfrentado diversos obstáculos que dificultan su correcto funcionamiento. Asimismo, uno de los principales problemas radica en las limitaciones técnicas y operativas de la plataforma de la SUNAT, ya que las constantes fallas en el sistema afectan la transmisión de información, generando retrasos en el registro de operaciones y errores en la validación de comprobantes electrónicos (Amaya & Espinoza, 2024).

Esta situación no solo compromete la eficiencia del proceso tributario, sino que también incrementa la incertidumbre entre los contribuyentes, quienes deben enfrentar las consecuencias de estas deficiencias sin contar con una solución inmediata. Por otro lado, la falta de capacitación y de recursos tecnológicos limita la adopción del SIRE, pues gran parte

de los contribuyentes desconoce su funcionamiento y carece de asesoría contable (Tuesta & Espinoza, 2020). Esto aumenta la probabilidad de cometer errores en la declaración de impuestos, lo que puede derivar en sanciones y afectar la empresa (Serrano, 2023).

Asimismo, la complejidad normativa y la rigidez del sistema generan un entorno poco favorable para los pequeños contribuyentes. La dificultad para rectificar registros sin incurrir en sanciones, sumada a la imposición de multas por omisiones formales, refuerza la desconfianza en el sistema tributario y desincentiva la formalización. En lugar de facilitar el cumplimiento fiscal, estas dificultades pueden fomentar prácticas informales como una estrategia de protección ante posibles penalidades (Sánchez, 2023). En este contexto, resulta fundamental analizar cómo estas barreras impactan en la implementación del SIRE en las MYPE y qué estrategias pueden aplicarse para mejorar su operatividad en sectores con bajos niveles de digitalización (Barja, 2023). Por tanto, comprender estos desafíos permitirá identificar soluciones que favorezcan la adopción efectiva del sistema, promoviendo el cumplimiento tributario y la formalización de los contribuyentes en el país (Ogunsola, 2023).

Las MYPE constituyen el 97% del tejido empresarial peruano y generan una parte significativa del empleo formal e informal en el país. Su formalización es crucial para incrementar la base tributaria y mejorar la recaudación fiscal. Sin embargo, estas empresas enfrentan múltiples barreras para cumplir con sus obligaciones fiscales, lo que las mantiene en un estado de informalidad. Por tanto, el SIRE representa una valiosa oportunidad para optimizar su gestión tributaria, pero su éxito depende de que la administración tributaria implemente estrategias claras que realmente faciliten su adopción, minimizando los costos de cumplimiento y proporcionando asistencia técnica accesible (Ramirez, 2023).

El análisis de la adopción del SIRE en las MYPE puede abordarse desde la Teoría de la Capacidad Dinámica de las Empresas (Teece, 1997), la cual sostiene que las organizaciones deben desarrollar habilidades y procesos que les permitan adaptarse a entornos cambiantes. En este sentido, la limitada capacidad de las MYPE para integrar herramientas digitales como el SIRE compromete su eficiencia operativa y su cumplimiento tributario, afectando su competitividad y sostenibilidad en el mercado formal. Asimismo, la Teoría del Cumplimiento Tributario (Allingham & Sandmo, 1972) plantea que la decisión de los contribuyentes de cumplir con sus obligaciones fiscales está influenciada por la percepción del riesgo de sanción y el costo asociado al cumplimiento. En este contexto, la

complejidad normativa del SIRE, sumada a la falta de incentivos y apoyo técnico para su implementación, puede generar resistencia significativa entre los pequeños empresarios locales, lo que aumenta el riesgo de incumplimiento y afecta negativamente la recaudación tributaria, reforzando la persistente informalidad en el sector (Brockmeyer & Sáenz, 2025).

En ese sentido, el SIRE es una plataforma informática desarrollada por la SUNAT que permite la generación automática de los registros contables de compras y ventas a partir de la información contenida en los comprobantes electrónicos. Su objetivo es simplificar los procesos de declaración y reducir errores humanos en la gestión de impuestos. Por otro lado, el cumplimiento tributario se refiere al grado en que los contribuyentes acatan las normas fiscales establecidas por la autoridad tributaria. Esto implica la correcta declaración de ingresos, la liquidación y pago de impuestos dentro de los plazos establecidos y el mantenimiento de registros contables precisos. La adopción del SIRE busca mejorar este cumplimiento; sin embargo, su efectividad depende del acceso a capacitación especializada, infraestructura tecnológica adecuada y soporte técnico oportuno.

El estudio es relevante porque aborda una problemática actual que afecta el cumplimiento tributario de miles de contribuyentes del Régimen MYPE en el Perú. La literatura especializada identifica deficiencias técnicas y operativas en la implementación del SIRE, lo que sugiere la necesidad de ajustes normativos y estrategias de capacitación (Amaya & Espinoza, 2024). Desde una perspectiva económica, mejorar la adopción del SIRE puede fortalecer la formalización de las MYPE, incrementando la recaudación fiscal y reduciendo la evasión de impuestos. A nivel académico, este estudio contribuirá al análisis de las barreras tecnológicas en la gestión tributaria de pequeños contribuyentes, aportando información clave para futuras investigaciones y formulación de políticas públicas.

Estos desafíos pueden analizarse a la luz de la Teoría de la Capacidad Dinámica de las Empresas (Teece, 1997), que resalta la importancia de las habilidades organizacionales para adaptarse a cambios tecnológicos, y de la Teoría del Cumplimiento Tributario (Allingham & Sandmo, 1972), que explica el rol de la percepción de riesgo y los costos asociados en las decisiones de los contribuyentes. Por tanto, se plantea como objetivo determinar la influencia de la adopción del SIRE en el cumplimiento tributario de los contribuyentes del Régimen MYPE Tributario en la provincia de El Collao, Puno.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio corresponde a una investigación aplicada con enfoque cuantitativo, orientada a analizar datos numéricos de manera objetiva para evaluar la adopción del Sistema Integrado de Registros Electrónicos (SIRE) y su relación con el cumplimiento tributario. Se utilizó un diseño no experimental de tipo transversal, lo que permitió observar las variables sin manipulación y obtener información en un único momento temporal, identificando patrones y asociaciones en el contexto de los contribuyentes del Régimen MYPE en la provincia de El Collao, Puno (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023).

La población estuvo conformada por 45 contribuyentes registrados en el Régimen MYPE Tributario, de los cuales se seleccionó una muestra de 35 participantes mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la accesibilidad de los sujetos y a su disposición para participar en la investigación. La elección de esta estrategia de muestreo respondió a las condiciones de factibilidad del estudio y constituye una de sus limitaciones, ya que restringe la generalización de los resultados. La recolección de datos se realizó a través de una encuesta basada en un cuestionario de 24 ítems. El instrumento fue validado por tres expertos en contabilidad y finanzas, quienes evaluaron la pertinencia, claridad y coherencia de las preguntas. Asimismo, se calculó la confiabilidad mediante la prueba Alfa de Cronbach, obteniéndose coeficientes de 0.850 y 0.820, indicadores de una elevada consistencia interna en las dimensiones evaluadas (Quilia-Valerio et al., 2024b).

Para el procesamiento de la información se emplearon técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales. Inicialmente se utilizaron tablas de frecuencias con el fin de examinar la distribución y niveles de las variables. Posteriormente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, la cual determinó la necesidad de utilizar métodos no paramétricos. Finalmente, la relación entre las variables se evaluó mediante la prueba de correlación de Rho de Spearman, que permitió establecer la fuerza y dirección de la asociación entre la adopción del SIRE y el cumplimiento tributario.

En esa línea, se expone que todo el proceso investigativo se desarrolló bajo criterios éticos, garantizando la confidencialidad de la información proporcionada por los contribuyentes y asegurando su participación voluntaria.

RESULTADOS

La presente sección expone los hallazgos obtenidos tras el análisis descriptivo e inferencial de los datos recopilados, acerca de la adopción del sistema integrado de registros electrónicos. A continuación, se presenta el análisis descriptivo e inferencial de los datos recopilados, con el objetivo de caracterizar el comportamiento de las variables estudiadas y determinar las relaciones existentes entre ellas. En ese orden, el análisis descriptivo permite observar las tendencias, niveles de percepción y patrones generales manifestados por los encuestados. Posteriormente, el análisis inferencial profundiza en la identificación de asociaciones y efectos significativos, validando las hipótesis planteadas. Esta estructura facilita una comprensión integral de los resultados obtenidos. Así, se proporciona una base sólida para interpretar y sustentar las conclusiones de la investigación.

Tabla 1

Niveles de la adopción del SIRE y sus dimensiones

Niveles	Adopción al SIRE		Automatización de procesos		Integración de informes		Trazabilidad de las operaciones		Cumplimiento de normativas	
	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)
Bajo	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Medio	30	85,7	31	88,6	34	97,1	31	88,6	30	85,7
Alto	5	14,3	4	11,4	1	2,9	4	11,4	5	14,3
Total	35	100,0	35	100,0	35	100	35	100,0	35	100,0

Los resultados reflejan que, según los contribuyentes, la adopción del SIRE se encuentra en un nivel medio, representando el 85,7 % de las respuestas. Esta tendencia también se observa en las dimensiones evaluadas: el 88,6 % considera que la automatización de procesos es media, el 97,1 % opina lo mismo respecto a la integración de informes, el 88,6 % sobre la trazabilidad de las operaciones y el 85,7 % en cuanto al cumplimiento de normativas. Solo una pequeña proporción percibe un nivel alto de adopción en estas áreas, y no se registraron valoraciones de nivel bajo. Esto indica que, aunque el SIRE ha logrado una implementación funcional para la mayoría, todavía predomina una percepción de desarrollo intermedio, indicando oportunidades para fortalecer el uso avanzado del sistema y mejorar su impacto en la gestión de los procesos tributarios.

Tabla 2*Niveles del cumplimiento tributario y sus dimensiones*

Niveles	Cumplimiento tributario		Presentación y declaración de impuestos		Presentación de los libros y registros electrónicos		Cumplimiento de formalidades del llevado del RVIE y RCE		Cierre de los registros electrónicos	
	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)	(f)	(%)
Bajo	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Medio	30	85,7	31	88,6	29	82,9	31	88,6	31	88,6
Alto	5	14,3	4	11,4	6	17,1	4	11,4	4	11,4
Total	35	100,0	35	100,0	35	100	35	100,0	35	100,0

Los resultados muestran que, según los contribuyentes encuestados, el cumplimiento tributario en general se sitúa mayoritariamente en un nivel medio, alcanzando el 85,7 % de las respuestas. Esta misma tendencia se refleja en cada una de las dimensiones evaluadas: la presentación y declaración de impuestos fue considerada de nivel medio por el 88,6 %; la presentación de libros y registros electrónicos por el 82,9 %; el cumplimiento de formalidades del RVIE y RCE por el 88,6 %, y el cierre de los registros electrónicos también por el 88,6 %. La percepción de un nivel alto de cumplimiento es minoritaria y no se registraron valoraciones de nivel bajo. Esto evidencia que, aunque la mayoría de los contribuyentes encuestados cumple con sus obligaciones tributarias de manera adecuada, aún hay espacio para mejorar la eficiencia y la rigurosidad en los procesos, especialmente en el manejo de registros electrónicos y la formalidad en sus cierres.

226

Tabla 3*Síntesis de los resultados inferenciales de las pruebas de hipótesis*

Hipótesis	Variables	Rho de Spearman		
		Sig. Bilateral	Coefficiente de correlación	N
Hip. Gral.	Adopción del SIRE incide en el cumplimiento tributario	,001	,533	35
Hip. Esp. 1	Adopción del SIRE incide en la presentación y declaración de impuestos	,000	,623	35
Hip. Esp. 2	Adopción del SIRE incide en la presentación de los libros y registros electrónicos	,005	,464	35

Hip. Esp. 3	Adopción del SIRE incide en el cumplimiento de formalidades del llevado del RVIE y RCE	,030	,367	35
Hip. Esp. 4	Adopción del SIRE incide en el cierre de los registros electrónicos	,000	,880	35

Los resultados inferenciales muestran que, si existe una relación positiva y significativa entre la adopción del SIRE y el cumplimiento tributario general, con un coeficiente de Rho de Spearman de 0,533 y un valor de significancia de 0,001. En cuanto a las hipótesis específicas, se evidencia que la adopción del sistema si influye de manera significativa en la presentación y declaración de impuestos, alcanzando un coeficiente de 0,623. También se observa una relación positiva con la presentación de libros y registros electrónicos (coeficiente de 0,464) y con el cumplimiento de las formalidades del RVIE y RCE, aunque en este último caso la fuerza de la relación es moderada (coeficiente de 0,367). Finalmente, destaca una fuerte incidencia con el cierre de los registros electrónicos, donde el coeficiente alcanza 0,880, indicando una incidencia altamente significativa. Estos resultados permiten concluir que la adopción del SIRE fortalece diversos aspectos del cumplimiento tributario entre los contribuyentes analizados.

227

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En cuanto al objetivo general, se identificó una asociación significativa, aunque de intensidad baja, entre la adopción del SIRE y el cumplimiento tributario en general, lo que respalda la hipótesis alterna planteada. Este hallazgo coincide con Brockmeyer y Sáenz (2025), quienes sostienen que los sistemas de registros electrónicos reducen la evasión y fomentan un mayor orden contable. De igual manera, Barja (2023) resalta que la digitalización fortalece la cultura de cumplimiento mediante una fiscalización más automatizada, mientras que Ogunsola (2023) enfatiza que la clave de su éxito radica en la simplificación normativa y en el acompañamiento institucional. En síntesis, aunque el impacto del SIRE aún es incipiente, se reconoce su aporte en el cumplimiento tributario, el cual podría incrementarse con medidas complementarias de apoyo técnico y formativo.

En relación con el primer objetivo específico, que buscó analizar la asociación entre la adopción del SIRE y la oportunidad en la presentación de registros, los resultados muestran que no existe una relación estadísticamente significativa. Este hallazgo puede explicarse por diversas razones. Por un lado, Tuesta y Espinoza (2020) sostienen que una de las principales barreras para la implementación del sistema en las micro y pequeñas empresas (MYPE) es la limitada disponibilidad de recursos tecnológicos, lo que dificulta cumplir con los plazos establecidos por la SUNAT. De manera complementaria, Quilia et al. (2023) señalan que muchas MYPE continúan utilizando prácticas contables manuales y tradicionales, retrasando su adaptación al entorno digital y afectando la puntualidad de sus obligaciones. Asimismo, Serrano (2023) argumenta que la resistencia al cambio y el desconocimiento del SIRE restringen su eficacia, ocasionando que los registros se realicen fuera de los plazos o no se presenten oportunamente. En consecuencia, aunque el SIRE tiene potencial para mejorar la eficiencia, su impacto en la oportunidad de los registros aún no se evidencia de forma clara en el contexto analizado.

Respecto al segundo objetivo específico, orientado a la exactitud en la declaración de impuestos, los hallazgos también reflejan la ausencia de una asociación significativa. Este resultado coincide con Intriago et al. (2023), quienes afirman que muchos contribuyentes cometen errores en sus declaraciones por una comprensión insuficiente del sistema electrónico. Esta dificultad es más notoria en quienes poseen bajo nivel educativo o carecen de capacitación digital. A su vez, Amaya y Espinoza (2024) advierten que las fallas estructurales del SIRE, como la inestabilidad de la plataforma y los errores en la validación de comprobantes, generan omisiones o duplicidades de datos que afectan la calidad de las declaraciones. De manera similar, Poma (2024) resalta que los constantes cambios normativos en el ámbito tributario peruano dificultan que las MYPE se mantengan actualizadas, lo que incrementa la posibilidad de errores. Así, aunque el SIRE pretende estandarizar los procesos, su adopción no ha logrado mejorar la precisión de las declaraciones en el contexto evaluado.

En cuanto al tercer objetivo, vinculado con el cumplimiento formal, los resultados muestran una asociación positiva de intensidad moderada, lo que indica que en este aspecto el sistema sí ha generado un impacto favorable. De acuerdo con Gómez et al. (2024), la

sistematización contable mediante plataformas como el SIRE permite a los contribuyentes un mayor control de sus operaciones, facilitando el cumplimiento de los requisitos establecidos por la administración tributaria. En esta misma línea, Ramírez-Álvarez et al. (2022) sostienen que la digitalización de registros contribuye a reducir errores formales y a mejorar la transparencia tributaria. Además, Urdaneta et al. (2020) remarcan que la existencia de incentivos y beneficios concretos favorece la disposición de las MYPE hacia la adopción tecnológica, explicando por qué el SIRE, pese a sus limitaciones técnicas, ha mostrado resultados positivos en el cumplimiento formal.

Finalmente, el estudio permitió comprender la influencia de la adopción del SIRE en el cumplimiento tributario de los contribuyentes del Régimen MYPE Tributario en la provincia de El Collao, Puno. Los resultados evidencian que la implementación del sistema constituye un avance hacia la modernización, aunque su impacto no se manifiesta de manera homogénea en todas las dimensiones analizadas. En términos generales, se identificó una asociación significativa, pero de baja intensidad, lo que revela la existencia de factores estructurales, formativos y operativos que limitan su pleno aprovechamiento.

De forma más específica, se determinó que el SIRE no incide de manera significativa ni en la oportunidad con que los contribuyentes presentan sus registros ni en la exactitud de sus declaraciones, debido a limitaciones técnicas, bajo dominio del sistema o escasa cultura digital. No obstante, se reconoció una asociación positiva y moderada en el cumplimiento formal, lo cual evidencia que la herramienta contribuye al ordenamiento de los procesos y a la organización documental de los contribuyentes.

En consecuencia, se plantea la necesidad de un enfoque integral que complemente la adopción del SIRE con capacitación continua, fortalecimiento institucional y mejoras en la infraestructura digital. Solo en un entorno favorable al aprendizaje y al acceso equitativo será posible garantizar la eficacia del sistema en la promoción del cumplimiento tributario, especialmente en contextos donde persisten brechas estructurales. Bajo estas condiciones, el SIRE puede consolidarse como un instrumento clave para optimizar la gestión tributaria y fortalecer una cultura fiscal sólida en el mediano y largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Amezcuca, M., Rivera, M., & Ruiz, M. (2020). Aplicación de la normativa contable y la evasión fiscal del impuesto sobre la renta en México. *Trascender, contabilidad y gestión*, 5(14). <https://doi.org/10.36791/tcg.v0i14.74>
- Barja, J. (2023). SIRE: ¿Cuáles son los principales cambios para tener en cuenta? *Ernst & Young Global Limited (EYG)*. https://www.ey.com/es_pe/tax/sistema-integrado-registros-electronicos-principales-cambios
- Brockmeyer, A., & Sáenz, M. (2025). Electronic Payment Technology and Tax Compliance: Evidence from Uruguay's Financial Inclusion Reform. *American Economic Journal: Economic Policy* 17(1), 242–72. <https://doi.org/10.1257/pol.20220434>
- Flores, J. (2023). *Desafíos y oportunidades del SIRE para las mypes en el Perú*. Instituto Pacífico.
- Gómez, L. G., Elías, F. A., y Vásquez, M. A. (2024). Cultura tributaria y cumplimiento tributario en personas generadoras de rentas de cuarta categoría en Perú. *Cuadernos De Contabilidad*, 25, 1-22. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cc25.ctct>
- Herbas, B., & Gonzales, E. (2020). Análisis de las causas del cumplimiento y evasión tributaria: Evidencia de Bolivia. *Revista Perspectivas*, (46), 119-184. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1994-37332020000200006&lng=es&tlng=es
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. (2ª ed.). México: Editorial Mc Graw Hill Education
- Intriago, H. M., Loor, K. I., & Cedeño, J. Y. (2023). Facturación electrónica como obligación tributaria para los contribuyentes del régimen general en Portoviejo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 13962-13976. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4445
- Ogunsola, A. (2023). Electronic taxation and tax compliance among smes in kogi state. *Malete Journal of Accounting and Finance*, 4(1), 11–24. <https://majaf.com.ng/index.php/majaf/article/download/108/76/182>
- Poma, J. A. (2024). Comprobantes electrónicos y su impacto en las obligaciones tributarias en Consur Trading Sociedad anónima cerrada, Nasca, 2023. *Revista*

- latinoamericana de ciencias sociales y humanidades, 5(5), 1086-1097.
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i5.2671>
- Quilia, J., Rimache, M., & Alfaro, J. (2023). Desafíos de la implementación del Sistema Integrado de Registros Electrónicos en la gestión tributaria empresarial: análisis peruano. *Transdigital*, 4(8), 1–16. <https://doi.org/10.56162/transdigital278>
- Quilia-Valerio, J., Rimache, M., Alfaro, J., Riveros, M., & Quilia, T. (2024b). *Explorando hacia la Excelencia Investigativa: La metodología Científica en Ciencias Contables y Empresariales*. Editorial Despertar Científico
- Quilia-Valerio, J., Rimache, M., Alfaro, J., Riveros, M., & Riveros, G. (2024a). *Contabilidad Gerencial: Un enfoque integral para la gestión empresarial*. Editorial Despertar Científico
- Ramirez, C. (2023). Política tributaria y formalización de las micro y pequeñas empresas en Lima Metropolitana. *Quipukamayoc*, 31(65), 53-60.
<http://dx.doi.org/10.15381/quipu.v31i65.24842>
- Ramírez-Álvarez, J., Oliva, N., & Andino, M. (2022). Cumplimiento tributario y facturación electrónica en Ecuador: evaluación de impacto. *Problemas del desarrollo*, 53(208), 97-123.
<https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2022.208.69712>
- Sánchez, J. (2023). *El ABC del SIRE: Sistema Integrado de Registros Electrónicos análisis completo de las obligaciones*. Gaceta Jurídica S.A.
- Serrano, M. (2023). Facturación electrónica y cumplimiento tributario. *Revista de Investigación e Innovación*, 8(3), 133-145. <https://doi.org/10.33262/rmc.v8i3.2925>
- Tuesta, S. & Espinoza, J. (2020). El impacto de las obligaciones tributarias electrónicas en la formalización de las micro y pequeñas empresas peruanas. *UCV HACER Rev. Inv. Cult*, 9(1), 35-44. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7946084.pdf>
- Urdaneta, A., Delgado, R., Yanez, M., Quijije, B., Y Cedeño, W. (2020). El cumplimiento tributario y su impacto en el entorno macroeconómico de la competitividad empresarial en Ecuador. *Revista Espacios*, 41(40), 142-156.
<https://www.revistaespacios.com/a20v41n40/a20v41n40p11.pdf>
- Valdiviezo, J. (2023). *Nuevo SIRE 2023. Análisis y desarrollo para una correcta aplicación*. Pacifico Editores.

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE
DIAGNÓSTICO Y PRUEBA PARA INSTRUMENTOS DEL
SISTEMA PITOT ESTÁTICO Y ENCONDER DE
AERONAVES EN LAS AERONAVES DEL EJÉRCITO
NACIONAL DE COLOMBIA ⁵⁵**

**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC DIAGNOSTIC AND
TESTING SYSTEM FOR PITOT-STATIC AND AIRCRAFT
RENDEZVOUS INSTRUMENTS ON COLOMBIAN
NATIONAL ARMY AIRCRAFT**

Jorge Enrique Rodríguez Navarro ⁵⁶

Rubén Darío Cuadros Antolinez ⁵⁷

Johnny Fernando Parrado Rodríguez ⁵⁸

Álvaro Plata Páez ⁵⁹

Julián Enrique Barrero García ⁶⁰

Mónica Estefanía Hernández García⁷

232

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.⁸

⁵⁵ Derivado del proyecto de investigación: Banco de pruebas para instrumentos del sistema pitot estático y enconder de aeronaves. “Banco de Pruebas Quebed”

⁵⁶ Especialista en Administración Aeronáutica. Ingeniero Aeronáutico. Oficial Centro de Desarrollo Tecnológico Brigada de Aviación No. 32 Apoyo y sostenimiento. jorge.rodrigueznav@buzonejercito.mil.co

⁵⁷ Tecnólogo en electrónica y comunicaciones Suboficial investigación desarrollo e innovación Brigada de Aviación No. 32 Apoyo y sostenimiento. ruben.cuadros@buzonejercito.mil.co

⁵⁸ Especialista en Gerencia de Proyectos. Ingeniero Aeronáutico. Suboficial investigación desarrollo e innovación Brigada de Aviación No. 32 Apoyo y sostenimiento. johnny.parrado@buzonejercito.mil.co

⁵⁹ Ingeniero Electrónico. Suboficial Centro de Desarrollo Tecnológico Brigada de Aviación No. 32 Apoyo y sostenimiento. alvaro.plata@buzonejercito.mil.co

⁶⁰ Ingeniero Industrial. Magister en Educación Ambiental. Coordinador de Investigación de la Escuela Militar de Suboficiales “Sargento Inocencio Chincá”. Unives.emsub@cedoc.edu.co.

⁷ Ingeniera Civil. Especialista en Gerencia de Proyectos. Asesora de Investigación de la Escuela Militar de Suboficiales “Sargento Inocencio Chincá” asesorainvestigacion@cedoc.edu.co

⁸ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

El presente capítulo presenta los resultados de un proyecto de investigación enfocado en el desarrollo e implementación de un sistema automático de diagnóstico y prueba para los instrumentos del sistema pitot estático y encoder de las aeronaves del Ejército Nacional de Colombia. El sistema permite la evaluación precisa, eficiente y estandarización de los instrumentos de vuelo, desempeñando un papel fundamental en las operaciones aéreas, ya que proporcionan información a los pilotos sobre datos de vuelo esenciales relacionados con la altitud, la velocidad aerodinámica y la velocidad de ascenso o descenso, todos ellos vitales para la navegación y el control de vuelo.

El funcionamiento de estos instrumentos se basa en la medición de la diferencia entre la presión estática y la presión dinámica del aire, transformando dichas variaciones en datos aerodinámicos significativos. La precisión de las lecturas proporcionadas por el sistema pitot-estático resulta especialmente crítica durante las fases operacionales más sensibles del vuelo, como el despegue, el aterrizaje y las operaciones bajo reglas de vuelo por instrumentos (IFR). Asimismo, el codificador cumple una función clave al convertir la información de altitud en señales digitales, facilitando la transmisión automática de datos a los sistemas de control de tráfico aéreo y mejorando la conciencia situacional en el espacio aéreo controlado.

El estudio se basó en una metodología mixta (cuantitativa y cualitativa) con un enfoque descriptivo, aplicada en las etapas de diseño preliminar y desarrollo del prototipo. El sistema propuesto integra tecnologías de adquisición de datos y algoritmos de procesamiento para identificar y evaluar fallas en los componentes internos del sistema, optimizando los procesos de mantenimiento y reduciendo significativamente los tiempos de inspección. A través del desarrollo de software especializado, se logra una verificación precisa y eficiente de los instrumentos de altimetría y encoder de la aeronave. Como resultado, se ha avanzado en la automatización del diagnóstico, permitiendo la identificación de componentes defectuosos en cuestión de minutos. Esto ha mejorado la eficiencia de los procesos de mantenimiento, reducido el tiempo de inactividad de las aeronaves y facilitado la disponibilidad de componentes para su reemplazo. Además, se ha disminuido la dependencia tecnológica y los errores humanos, asegurando la operatividad de las aeronaves.

PALABRAS CLAVE: Automatización, diagnóstico, encoder, pitot estático, prueba, tecnologías de la información, sistema de control.

ABSTRACT

This chapter presents the results of a research project focused on the development and implementation of an automatic diagnostic and testing system for the pitot-static and encoder system instruments of the Colombian National Army aircraft. The system enables the accurate, efficient, and standardized evaluation of flight instruments. It plays a fundamental role in air operations, providing pilots with information on essential flight data related to altitude, airspeed, and rate of climb or descent, all of which are vital for navigation and flight control.

The operation of these instruments relies on the measurement of the difference between static and dynamic air pressure, transforming these variations into meaningful aerodynamic data. The accuracy of the readings provided by the pitot-static system is especially critical during the most sensitive operational phases of flight, such as takeoff, landing, and operations under instrument flight rules (IFR). Likewise, the encoder plays a key role in converting altitude information into digital signals, facilitating the automatic transmission of data to air traffic control systems and improving situational awareness in controlled airspace.

The study was based on a mixed methodology (quantitative and qualitative) with a descriptive approach, applied in the preliminary design and prototype development stages. The proposed system integrates data acquisition technologies and processing algorithms to identify and evaluate faults in the system's internal components, optimizing maintenance processes and significantly reducing inspection times. Through the development of specialized software, accurate and efficient verification of the aircraft's altimetry and encoder instruments is achieved. As a result, progress has been made in diagnostic automation, allowing the identification of defective components in a matter of minutes. This has improved the efficiency of maintenance processes, reduced aircraft downtime, and facilitated the availability of components for replacement. Furthermore, technological dependence and human error have been reduced, ensuring aircraft operability.

Keywords: Automation, diagnostics, encoder, pitot-static, testing, information technology, control system.

INTRODUCCIÓN

Hacia el año 1997, la Aviación del Ejército Nacional adquirió sus primeras aeronaves UH-60L de fabricación norteamericana (Tovar & Figueroa, 2021). Lo que señaló el comienzo de un crecimiento progresivo a través de los años de la flota de aeronaves del Ejército, tanto así que esta Fuerza posee la flota de aeronaves de ala rotatoria más grande del país, así como de Centro y Suramérica (DAVAA, 2018). Sin embargo, por las diferentes misiones que se cumplen a lo largo y ancho de la nación se enfrentan diversos desafíos, en especial en lo que se refiere a mantenimiento. En este sentido, el mantenimiento es vital para asegurar la disponibilidad y funcionalidad de las aeronaves. Por ello, es fundamental atender la necesidad urgente de mejorar la eficiencia y precisión en el mantenimiento aeronáutico mediante la automatización de procesos que tradicionalmente se han basado en técnicas manuales. A lo largo del desarrollo del banco de pruebas y durante el desarrollo del software, se implementaron metodologías de investigación mixta y metodologías avanzadas de ingeniería de software para desarrollar un sistema que no solo reduce significativamente los tiempos de diagnóstico, sino que también mejora la precisión y confiabilidad de los resultados al integrar inteligencia artificial y procesamiento de señales digitales. Durante el estudio también se analiza los beneficios económicos proyectados, demostrando una reducción sustancial en los costos de reparación tanto locales como externos, y destaca la flexibilidad del sistema para adaptarse a otros componentes aeronáuticos, estableciendo una base sólida para futuras innovaciones tecnológicas en el mantenimiento de aeronaves.

En la actualidad, la Aviación del Ejército Nacional de Colombia opera una flota de aeronaves de ala fija (aviones) y ala rotatoria (helicópteros). Estas aeronaves dependen de instrumentos pitot estáticos y codificadores (encoder) para mediciones esenciales como altitud, velocidad, ruta de ascenso y descenso, así como identificación de otras aeronaves. Dado este contexto, la demanda de reparaciones y mantenimiento para estos componentes es significativa.

Al incorporar procesos automatizados para la detección de fallas, inspecciones y pruebas, respaldados por los equipos de pruebas adecuados, se busca impactar positivamente en múltiples aspectos. En primer lugar, reducir de manera drástica la posibilidad de errores

humanos en las mediciones, además de acelerar estas operaciones críticas, la automatización permite detectar fallos en etapas tempranas, lo que contribuye a mejorar la calidad del mantenimiento proporcionado durante las reparaciones de estos elementos. Así mismo, la automatización de estas pruebas proporciona una trazabilidad adicional al almacenar informes digitales detallados de los componentes que han sido inspeccionados o sometidos a pruebas. Este enfoque no solo agiliza los procesos, sino que también establece una base sólida para la gestión eficiente y la mejora continua de la calidad en el mantenimiento de estos componentes vitales para la operación de las aeronaves.

La presente investigación se desarrolló directamente sobre el sistema de instrumentos pitot-estáticos y codificadores de aeronaves. El sistema pitot-estático es un conjunto fundamental en la instrumentación de las aeronaves, encargado de suministrar las presiones estáticas y dinámicas necesarias para el funcionamiento de indicadores críticos como el velocímetro (ASI), el altímetro y el indicador de velocidad vertical (VSI). El tubo pitot capta la presión total (presión dinámica más presión estática) a través de una abertura frontal y la transmite al ASI, mientras que la presión estática se obtiene por medio de puertos laterales en la aeronave que se conectan a los tres instrumentos. El altímetro, específicamente, utiliza cápsulas aneroides selladas que se expanden o contraen en función de los cambios en la presión atmosférica, permitiendo medir la altitud. En algunas aeronaves, estos altímetros incluyen codificadores que convierten las señales mecánicas en impulsos eléctricos, los cuales son transmitidos a sistemas como el transpondedor, que reporta automáticamente la altitud al control de tráfico aéreo. Estos componentes son esenciales para la navegación segura, especialmente en operaciones instrumentales o de control de tráfico automatizado. (Administración Federal de Aviación, FAA, 2023)

237

MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación adoptó un enfoque mixto, integrando métodos cualitativos y cuantitativos con el propósito de fortalecer la validez de los hallazgos y ofrecer una comprensión más amplia del fenómeno estudiado. Desde la perspectiva cualitativa, se empleó la observación directa y el análisis documental de manuales técnicos, registros de pruebas y protocolos operacionales para caracterizar las condiciones funcionales del banco

de pruebas de instrumentos pitot-estáticos y encoder. En complemento, la dimensión cuantitativa se abordó mediante la recolección y análisis de datos obtenidos durante las pruebas funcionales, utilizando tarjetas de adquisición digital, multímetros PXI y software especializado para el procesamiento de señales, lo cual permitió la obtención de métricas objetivas relacionadas con el desempeño de los componentes evaluados. Esta combinación metodológica se sustenta en la propuesta de Hernández, Fernández-Collado y Baptista (2014), quienes destacan la utilidad del enfoque mixto para abordar problemas técnicos complejos que requieren tanto comprensión contextual como análisis estadístico riguroso. Este banco de pruebas está construido sobre una estructura metálica en acero AISI 1025, con configuración modular tipo rack, lo cual permite la integración organizada y segura de todos los sistemas eléctricos, electrónicos y de prueba necesarios.

En la parte frontal del banco como se puede observar en la imagen 1, se ubica una estación de trabajo que integra: un teclado, mouse, pantalla táctil FPT 1015 y control manual del Air Data Test Set, permitiendo al operador el ingreso, visualización y control de los parámetros de prueba. Esta pantalla está interconectada al procesador industrial NI PXIe 1065 mediante un sistema de cables VGA-GPIB y USB, garantizando comunicación de datos y funcionalidad táctil. La alimentación eléctrica se realiza con voltaje de 115VAC/60Hz, distribuida desde una regleta trasera.

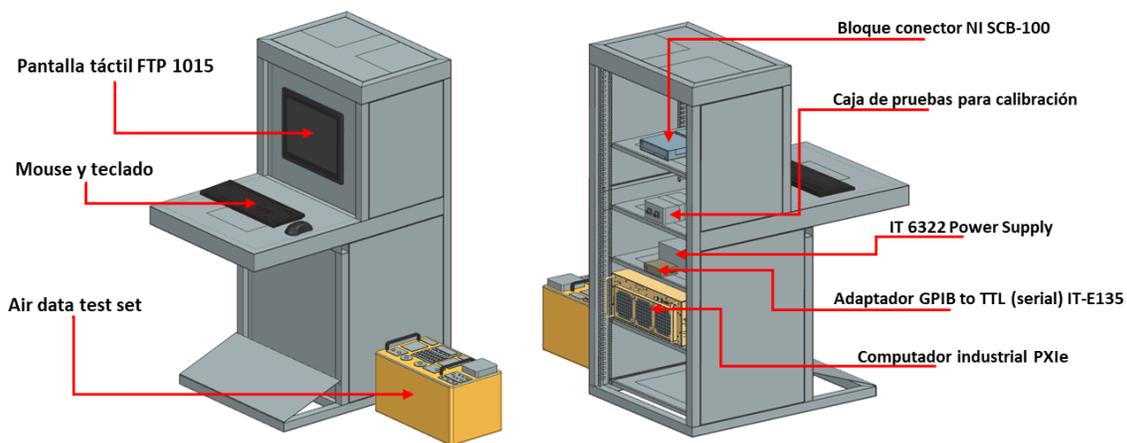
El sistema interno está dividido en bandejas metálicas modulares, donde se alojan: una barra de distribución DC, bloques de conexión SCB-100, relevos contactores K1 y K2, tarjetas de adquisición de datos digitales NI PXI 6511, multímetros NI PXI 4071, fuentes de alimentación programables NI PXI 4110 y una planta de potencia de triple salida IT6322, interconectadas mediante protocolos GPIB y serial. También se incluye una caja de autopuebas para verificación de calibración interna del banco. Los conectores J1, J2 y J3, ubicados en la parte superior trasera, permiten la conexión física de los instrumentos bajo prueba.

Este banco fue concebido como una metodología original para pruebas funcionales en tierra, permitiendo al técnico visualizar en tiempo real los parámetros operativos de los componentes evaluados y generar automáticamente un informe con los resultados obtenidos, el cual puede ser analizado para determinar fallas o comportamientos anómalos. La

originalidad de este enfoque radica en su integración de múltiples sistemas de adquisición, monitoreo y alimentación, reduciendo el tiempo de diagnóstico y aumentando la precisión del análisis.

Cabe señalar que, dado el carácter de prototipo funcional y su implementación en un entorno operativo militar (Base Militar de Tolemaida, Colombia), esta metodología presenta como limitación la dependencia del entrenamiento técnico del personal para una operación efectiva y segura. No se emplearon métodos estadísticos en esta fase de validación funcional, dado que el objetivo fue verificar el comportamiento de los sistemas bajo condiciones simuladas específicas y no obtener inferencias poblacionales. Para futuros desarrollos, se plantea incorporar pruebas comparativas y análisis estadísticos de confiabilidad entre diferentes unidades evaluadas.

Imagen 1. Ubicación componentes del Banco de prueba de los instrumentos del sistema pitot estático y encoder.



Nota. Elaboración propia

A continuación, se presenta en la tabla 1, un inventario técnico detallado de los componentes, materiales e insumos empleados en la construcción e implementación del banco de pruebas funcionales para instrumentos pitot-estáticos y encoders de aeronaves. Esta relación incluye dispositivos electrónicos, módulos PXI, fuentes de alimentación, tarjetas de

adquisición de datos, conectores, cables, elementos estructurales y accesorios auxiliares, todos seleccionados con base en criterios de compatibilidad técnica, disponibilidad y cumplimiento de las especificaciones exigidas en los manuales de mantenimiento aeronáutico.

Tabla 1. Relación de Equipos y materiales requeridos

EQUIPOS				
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PARTE / NÚMERO	CANTIDAD / UNIDADES	CARACTERÍSTICAS / NOTAS
01	Pantalla táctil	FTP-1015 746505-01	01	Intercambiable con otro modelo de igual o mejores características técnicas de acuerdo a manual técnico. Opera con 115VAC/60 Hz.
02	Computador industrial	PXIe-1065 779730-01	01	
03	Fuente de potencia DC de triple salida	IT6322	01	
04	Air data test system	ADTS-405F 101-01190 DPS500	01	
05	Controlador PXI	PXIe-8135	01	Intercambiable con otro modelo de igual o mejores características técnicas de acuerdo a manual técnico.
06	Tarjeta E/S multifunción cPCI	75C3	01	
07	Tarjeta de simulación cPCI	75DS2	01	
08	Módulo PXI de E/S Digital	PXI-6511 778967-01	02	
09	Módulo PXI de E/S Digital	PXI-6512 778969-01	02	
10	Multímetro Digital PXI	PXI-4071	02	
11	Módulo PXI Multiplexor de Conmutación	PXI-2527 778572-27	02	
12	Osciloscopio PXI	PXI-5105 779685-01	01	Intercambiable con otro modelo de igual o mejores características técnicas de acuerdo a manual técnico.
13	Fuente de Alimentación Programable PXI	PXI-4110 779647-10	01	
14	Osciloscopio PXI	PXI-5154 780319-01	01	
15	Módulo PXI de E/S Multifunción	PXI-6239 779626-01	01	
16	Bloque terminal NI	TB-2627	02	

EQUIPOS				
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PARTE / NÚMERO	CANTIDAD / UNIDADES	CARACTERÍSTICAS / NOTAS
17	Adaptador GPIB a TTL	IT-E135	01	Intercambiable con otro modelo de igual o mejores características técnicas de acuerdo a manual técnico. Opera con 115VAC/60 Hz.

MATERIALES E INSUMOS				
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PARTE / NÚMERO	CANTIDAD / UNIDADES	CARACTERÍSTICAS / NOTAS
18	Mouse	M705	01	Intercambiable con otro modelo de igual o mejores características técnicas de acuerdo a manual técnico.
19	Keyboard	K350	01	
20	Caja de pruebas de calibración banco de instrumentos	N/A	01	Intercambiable con otro modelo de igual o mejores características técnicas de acuerdo a manual técnico.
21	Power Cord, AC, US, 120 VAC, 2.3 meters	763000-01	02	
22	DVI-1 (male) to DVI-.0 (female) & VGA (Female) Splitter	80868-01	01	
23	X 13 GPIB Cable, MicroD25 to Shielded cable/Standard connector, 2M	183285-02	01	
24	CB-37F-HVD 37-pin Screw Terminal Bfk, UL rec 150V CAT 11, Din Rail	779491-01	01	
25	SH37F-37M-2 37-Pin Female to Male Shielded 1/0 Cable, 2 m	778621-02	01	
26	SCB-100 Shielder connector block	776990-01	04	
27	CABLE ASSY, Type SH100--100-FLEX, 2 m	85095-02	04	
28	P -2 Pro be Set	184698-01	02	
29	Relevos contactores	70550-02048-101	02	
30	SMB 100, SMB Female to BNC Female Coax Cab, 50 Ohms, 2 ft, Qty 8	778415-01	02	
31	089 FEMALE to 089 FEMALE serial cable, six feet long, Wired 1 to 1	RS-232 CABLES	01	
32	Cable SH68-68 D1, shielded cable, 2m	183432-02	02	
33	Transformador de potencia XP Power	XP POWER 195325C-01	01	
34	HV6 BAN4 cable	192795-0R2	02	
35	Conector eléctrico	MS3472W16-26S	01	
36	Conector eléctrico	MS3472W16-26P	01	
37	Db15 type A	N/A	01	
38	Cable AWG22	M22759/16-22	150 ft	

MATERIALES E INSUMOS					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PARTE / NÚMERO	CANTIDAD / UNIDADES	CARACTERÍSTICAS / NOTAS	
39	Cable AWG20	M22759/16-20	200 ft		
40	Cable AWG20	M22759/11-20	200 ft		
41	Expandable sleeve	054068-9	50 ft		
42	Conector	TNC/BNC	10		
43	Terminal Rojo 3/16"	MS25036-103	AR		
44	Lasing Tape	A-A-52081	1 rollo		
45	Screw	MS21207-C10-6	AR		
46	Anti-Static Wrist Strap	066-0002	01		
47	Receptacle/toma corriente	N7899-W	01		
48	Tubo rectangular 3"x 3/2"x 1/16"	AISI 1025 (cold rolled)	AR		Cantidades requeridas de acuerdo a plano PL-DTB-001-01 Estructura tubular.
49	Tubo cuadrado 3/2"x 3/2"x 1/16"	AISI 1025 (cold rolled)	AR		
50	Angulo (L) 1" x 1" calibre 0.0625"	AISI 1025 (cold rolled)	AR		Cantidades requeridas de acuerdo a plano PL-DTB-001-02 Ángulo-Riel.
51	Riel 2" x 0.618"	Acero al carbono	AR		
52	Lamina t=0.0625"	AISI 1025 (cold rolled)	AR	Cantidades requeridas de acuerdo a plano PL-DTB-001-03 Tapas estructurales y PL-DTB-001-04 Accesorios.	

Nota. Elaboración propia

El desarrollo de esta investigación se organiza en tres fases metodológicas, cada una alineada con los objetivos específicos del estudio. Se emplearon enfoques cualitativos y cuantitativos de manera complementaria, permitiendo una comprensión integral del problema y la construcción de una solución tecnológica aplicable al entorno del mantenimiento aeronáutico.

Fase 1: Análisis inicial

Durante esta primera etapa, se realizó una revisión bibliográfica sistemática para contextualizar el problema, identificar antecedentes relevantes y establecer el marco teórico que sustenta el proyecto. Desde un enfoque cualitativo, se analizaron las condiciones iniciales asociadas a las fallas del sistema objeto de estudio, mientras que, mediante herramientas

cuantitativas respaldadas por análisis estadísticos, se identificaron relaciones funcionales entre variables críticas.

Posteriormente, se aplicó un análisis técnico comparativo fundamentado en la covariación de variables (Ayala, 2021), lo cual permitió identificar los factores determinantes para la resolución del problema. Con base en los resultados obtenidos, se determinaron los requerimientos técnicos y tecnológicos, incluyendo el hardware necesario para procesos de adquisición, recolección, análisis y control de datos.

Este análisis sirvió como base para el diseño del banco de pruebas orientado a la verificación funcional de los instrumentos del sistema pitot-estático y encoder en aeronaves. Así mismo, se efectuó un levantamiento de requerimientos técnicos, tanto de hardware como de software, y un análisis estructural y eléctrico de la plataforma tecnológica, asegurando su compatibilidad y desempeño frente a las exigencias del entorno operativo.

Fase 2: Diseño y Desarrollo de Software

Con base en los requerimientos funcionales y operacionales identificados durante la fase inicial, se procedió al diseño y desarrollo del software para el banco de pruebas de instrumentos aeronáuticos, adoptando un enfoque orientado al usuario final, en este caso los técnicos especialistas en mantenimiento aeronáutico (TEEI, TERM y TMA). Este desarrollo integró criterios técnicos normativos y la experiencia acumulada en procesos de verificación, diagnóstico y calibración de instrumentos del sistema pitot-estático y encoder.

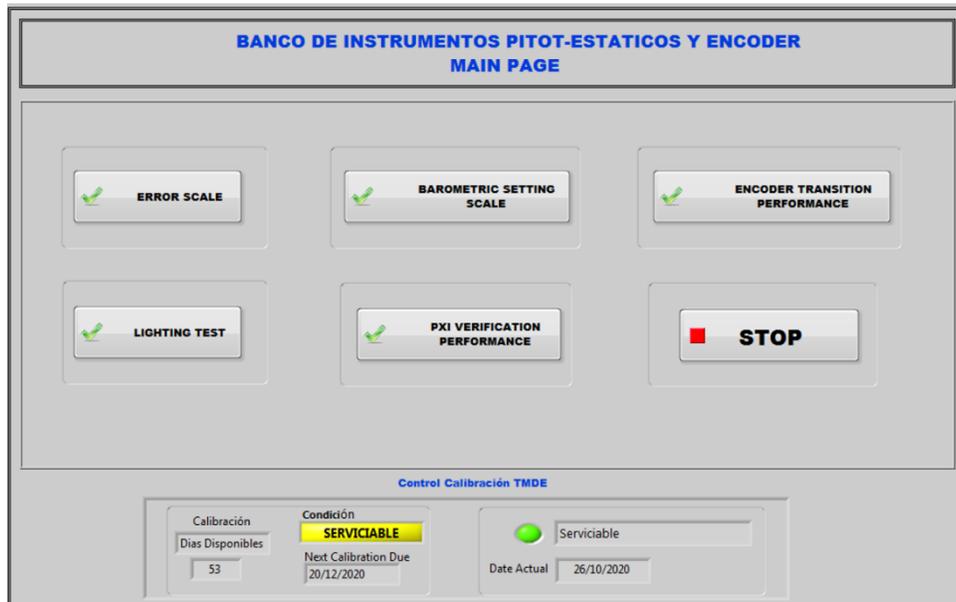
La arquitectura del software fue implementada utilizando el entorno de programación gráfica LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), basado en el modelo de flujo de datos. Esta elección permitió el diseño modular de una solución robusta y escalable, centrada en la automatización de pruebas, adquisición de datos en tiempo real, análisis y generación de informes con trazabilidad.

El software fue estructurado en torno al entorno Virtual Instruments (VI), el cual se compone de dos elementos fundamentales: el panel frontal, que proporciona la interfaz gráfica de usuario (GUI), y el diagrama de bloques, donde se define la lógica de control, las rutinas de prueba y el procesamiento de señales. Esta estructura permitió integrar funciones específicas como: verificación de tolerancias en escalas de error, configuración barométrica,

pruebas de transición del codificador, validación del rendimiento PXI y pruebas de iluminación de los instrumentos.

La interfaz gráfica fue diseñada con un enfoque de usabilidad, priorizando la navegación intuitiva y la interacción directa a través de una pantalla táctil FPT-1015 conectada al computador industrial NI PXIe-1065. Las distintas interfaces como se puede observar en la imagen 2, permiten al usuario ejecutar pruebas automatizadas o manuales, visualizar resultados en tiempo real, verificar estados de calibración del banco y acceder a informes digitales generados por cada prueba, los cuales incluyen variables como altitud estándar, presión equivalente, tolerancias y errores registrados.

Imagen 2. Interfaz principal para el banco de pruebas de los instrumentos del sistema pitot-estáticos y encoder de aeronaves.



244

Nota. Elaboración propia

El sistema se apoya en un conjunto de dispositivos electrónicos de alta precisión, entre ellos: tarjetas de adquisición de datos digitales NI PXI 6511, multímetros digitales NI PXI 4071, fuentes de alimentación programables NI PXI 4110 e IT6322, así como bloques conectores SCB-100. Todos estos dispositivos son controlados desde LabVIEW mediante protocolos

GPIB y señales TTL, garantizando compatibilidad, confiabilidad y sincronización entre los módulos del banco de prueba y los instrumentos bajo evaluación.

El resultado del desarrollo es una herramienta tecnológica avanzada que permite realizar pruebas funcionales, verificar condiciones operativas, ejecutar diagnósticos de falla y generar evidencia documental, todo en conformidad con los procedimientos establecidos por la División de Aviación Asalto Aéreo del Ejército Nacional. Este software no solo optimiza los tiempos de mantenimiento y aumenta la disponibilidad de componentes aeronáuticos, sino que también fortalece la autonomía técnica de la Aviación del Ejército, garantizando precisión, trazabilidad y eficiencia en las labores de sostenimiento.

Fase 3: Implementación y Validación

En la fase final, se implementó el banco de pruebas y se presentó el sistema desarrollado a los usuarios finales, junto con instrucciones operativas claras para su correcta utilización. Esta etapa tuvo como propósito facilitar la apropiación del recurso y evaluar su efectividad frente a los objetivos definidos en la investigación.

Desde una perspectiva cuantitativa, se midió el tiempo promedio de ejecución de las pruebas, el cual fue tabulado en función de los módulos y tarjetas de adquisición utilizados, y posteriormente comparado con los resultados obtenidos mediante equipos de prueba similares convencionales.

De forma complementaria, se aplicó un análisis cualitativo de usabilidad, basado en entrevistas semiestructuradas a técnicos especialistas, quienes evalúan los casos de uso, la interfaz gráfica y la funcionalidad general del sistema. Las observaciones se documentaron con el fin de identificar oportunidades de mejora y realizar los ajustes necesarios al código.

La fase concluye con la entrega formal de los resultados, asegurando que los usuarios dispongan de las herramientas técnicas y metodológicas necesarias para aprovechar el sistema implementado. Esta experiencia fortalece los procesos de automatización y control en pruebas funcionales dentro del mantenimiento aeronáutico, promoviendo la mejora continua y la integración de nuevas tecnologías en los procedimientos técnicos del Ejército Nacional.

RESULTADOS

Los presentes resultados corroboran que el banco de pruebas cumple los objetivos técnicos planteados en la investigación, proporcionando un sistema nacional confiable para la verificación y mantenimiento predictivo de los instrumentos, reduciendo la dependencia tecnológica extranjera y los altos tiempos y costos asociados a envíos internacionales para mantenimiento.

La capacidad de detectar variaciones significativas en voltaje y señales digitales en condiciones anómalas permite anticipar fallas, disminuir los tiempos de inactividad de la flota aérea y mantener altos estándares de seguridad operacional.

El uso de datos experimentales y de manual técnico para parametrización y análisis estadísticos de variables refuerza la implementación de un mantenimiento predictivo más efectivo (Ramos Azcuy & Guerra Bretaña, 2019).

El análisis estructural mediante FEA aporta valor al certificar que el banco es tanto funcional como duradero y seguro para ambientes militares exigentes. La integración del conocimiento práctico de los técnicos de aviación en todo el desarrollo favorece la usabilidad y la adaptación de la herramienta a contextos reales.

El mejoramiento continuo en el tratamiento ambiental corresponde al concepto de producción más limpia, el cual obedece a un proceso dinámico y sistemático, que debe aplicarse permanentemente, con objetivos de mayor alcance, mediante los principios de gradualidad, que permiten la búsqueda de la excelencia sin comprometer la estabilidad económica de la operación y el funcionamiento de las aeronaves y equipos de prueba.

Al realizar pruebas de laboratorio operacionales y de diagnóstico en sitio, se simulan las condiciones de operación aeronáutica y minimizando y mitigando el ruido generado por las plantas de potencia Howard, usadas comúnmente en mantenimiento aeronáutico de línea y de hangar. La implementación de bancos de prueba digitales y automáticos se minimiza y mitiga el ruido en los hangares dado que en su diseño se han implementado fuentes de alimentación con especificaciones técnicas de laboratorio que reducen la contaminación auditiva del personal que trabaja en el laboratorio.

Teniendo como referencia las fallas presentadas por los sistemas, los datos técnicos de funcionamiento y operación, los requerimientos de potencia, la investigación y análisis de las señales digitales transmitidas por el codificador (encoder), se realiza un levantamiento de requerimientos para seleccionar el hardware complementario requerido y de esta forma implementar una metodología y desarrollo de software que involucre las áreas relacionadas a la adquisición, recopilación, análisis y control de datos, para con ello lograr el desarrollo del banco de pruebas de los instrumentos del sistema pitot estático y encoder de aeronaves que estará diseñado sobre una estructura metálica tipo rack modular, en su parte frontal tendrá un puesto de trabajo con mouse y teclado, un control manual del equipo de prueba Air Data Test Set, una pantalla táctil FTP 1015 para la visualización y control de los parámetros de operación de las pruebas, en la parte frontal se ubicaran los equipos bajo prueba, en su interior contendrá bandejas metálicas modulares que alojaran plantas de potencia, barras de distribución e interconexión eléctrica, contactores, convertidores y un procesador industrial PXIe, donde de manera automática se implementara un software de prueba embebido en LabVIEW, que mediante una máquina de estado finita realizara procesos de diagnóstico y pruebas automáticos, para con esto alcanzar la realización de pruebas funcionales de los parámetros de operación y funcionamiento de los instrumentos del sistema pitot estático y encoder de aeronaves.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El desarrollo del banco de pruebas para los instrumentos del sistema Pitot-estático y Encoder de aeronaves UH-60 y Huey II permitió obtener mediciones precisas y estables de parámetros críticos para la correcta operación de dichos sistemas (Ejército Nacional de Colombia, 2025). Se realizaron pruebas funcionales que incluyeron la medición de voltajes de alimentación a los Encoders y altímetros, así como la evaluación de señales de salida digital de altitud codificada y pruebas eléctricas relativas a la iluminación y vibrador del sistema.

Los datos obtenidos durante las pruebas mostraron que, bajo condiciones normales de operación, los valores medidos se ajustaron estrechamente a las referencias especificadas

en el manual técnico (Phillips, sf). Por ejemplo, el voltaje de alimentación de Encoders y vibradores se mantuvo cercano a 28 Vdc y las señales de iluminación a 5 Vdc, con mediciones promedio que variaron menos de 0.02 V respecto de los valores nominales, lo cual demuestra la estabilidad del sistema.

En condiciones simuladas de falla, particularmente con un altímetro defectuoso, se registró una desviación importante en la medición de altitud: la lectura del codificador descendió a 1,300 pies en vez de los 1,700 pies esperados, reflejando la capacidad del banco para detectar anomalías relevantes. El análisis de señales digitales codificadas mostró alteraciones en determinados bits de decodificación bajo condición de falla, afectando la precisión de la información transmitida.

Desde el punto de vista estructural, el banco de pruebas fue diseñado para soportar la instalación y operación de los equipos, validado mediante análisis de elementos finitos (FEA), lo que garantizó la resistencia mecánica y confiabilidad del montaje (Siemens, 2025).

La selección de componentes eléctricos, como el cable AWG 22 bajo la especificación MIL-W-22759/16-22-9, fue avalada experimentalmente, con márgenes de seguridad holgados respecto a la corriente nominal.

El banco de pruebas desarrollado representa una herramienta tecnológica sólida y eficiente, adaptada a las necesidades de la Aviación del Ejército.

Se comprobó la precisión de medición de parámetros eléctricos y digitales, posibilitando la detección clara de condiciones normales y fallas.

La estadística descriptiva y parametrización experimental fortalecen el mantenimiento predictivo y el diagnóstico temprano.

El diseño estructural y la selección de componentes garantizan seguridad, confiabilidad y cumplimiento normativo.

El proyecto reduce significativamente la dependencia de servicios externos y mejora la disponibilidad operativa de la flota de la Aviación del Ejército.

La experiencia técnica práctica asegurada por la intervención de los usuarios finales refuerza la funcionalidad y apropiación tecnológica nacional. En síntesis, este desarrollo es

un aporte significativo a la autonomía tecnológica y la operatividad segura de los sistemas de instrumentos de altimetría y encoder de los Helicópteros UH-60 y Huey II.

Para el desarrollo de un banco automatizado destinado a la inspección, detección de fallas y realización de pruebas técnicas en el sistema de instrumentos pitot-estático y encoder de aeronaves, es fundamental comprender en detalle la estructura y el funcionamiento de cada uno de los componentes que lo conforman. Este conocimiento resulta esencial no solo para garantizar la precisión y confiabilidad del banco de pruebas, sino también para minimizar el riesgo de error humano en los procesos de mantenimiento y verificación técnica. Un análisis detallado de estos elementos permite establecer protocolos de prueba automatizados que aseguran la integridad del sistema y la seguridad operativa de los componentes así:

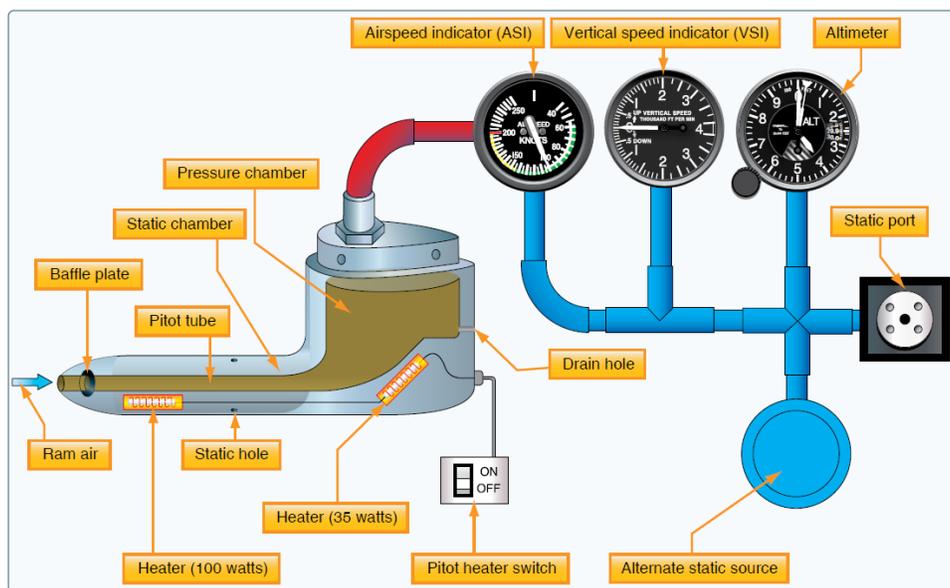
Los sistemas de medición en aeronaves desempeñan un papel fundamental en la seguridad y eficiencia operativa, ya que suministran a los pilotos información crítica en tiempo real sobre variables como velocidad, altitud y razón de ascenso o descenso. Entre estos sistemas, el sistema pitot-estático destaca como un componente esencial al proporcionar datos aerodinámicos precisos mediante la captación de la presión de impacto (presión total) y la presión estática. El tubo pitot, expuesto directamente al flujo del aire, mide la presión total, mientras que los puertos estáticos capturan la presión atmosférica sin estar influenciados por el movimiento de la aeronave. La comparación entre ambas presiones permite determinar la velocidad indicada del avión, y en combinación con una presión de referencia estándar, se puede calcular la altitud barométrica. Este sistema es vital para el correcto funcionamiento de instrumentos como el altímetro, el velocímetro y el indicador de velocidad vertical. Su confiabilidad es tal, que cualquier obstrucción o falla puede comprometer seriamente la operación segura del vuelo, como se ha documentado en diversos incidentes relacionados con su mal funcionamiento (Valero Gómez, 2024).

Es importante que previo al despegue, es indispensable realizar una inspección del tubo de pitot y de las tomas de presión estática, con el fin de verificar que no existan obstrucciones que comprometan su funcionamiento. La presencia de cuerpos extraños, como arena o insectos, puede alterar el registro preciso de parámetros críticos como la velocidad y

altitud de la aeronave, generando posibles desviaciones en la información que recibe el piloto y, por ende, afectando la seguridad del vuelo.

Para Santos (2022), las aeronaves de aviación ligera, el tubo de pitot suele estar ubicado debajo del ala, en una posición que permita captar directamente el flujo de aire frontal generado durante el desplazamiento. Este componente mide la presión total a través de un orificio en su extremo, mientras que las tomas de presión estática están instaladas en sectores del fuselaje con mínimas alteraciones aerodinámicas, lo que garantiza una lectura precisa de la presión ambiente. En la imagen 3 se identifica el diagrama esquemático del sistema con sus diferentes líneas de alimentación de los componentes que brindan información vital a los pilotos.

Imagen 3. Diagrama esquemático del sistema pitot-estático e instrumentos.



Nota. Manual del Piloto de Conocimientos Aeronáuticos (FAA-H-8083-25C)

El sistema pitot-estático es fundamental para la operación segura de una aeronave, ya que permite medir parámetros esenciales como la velocidad, la altitud y la tasa de ascenso o descenso. Este sistema combina la presión estática, que es la presión atmosférica ambiente presente incluso cuando la aeronave está en reposo, con la presión de impacto (también llamada dinámica), que aparece cuando la aeronave se mueve a través del aire. El tubo de

pitot capta la presión total (suma de la estática y dinámica), mientras que los puertos estáticos miden únicamente la presión estática. Esta información es transmitida a los instrumentos de vuelo: el indicador de velocidad utiliza la diferencia entre presión total y estática para mostrar la velocidad, el altímetro mide solo presión estática para indicar la altitud, y el indicador de velocidad vertical (VSI) también usa presión estática para mostrar el ritmo de ascenso o descenso. La correcta interpretación y funcionamiento de estos instrumentos como se menciona en la tabla 2, depende del flujo sin obstrucciones en ambos sistemas, ya que bloqueos pueden generar lecturas erróneas y comprometer la seguridad del vuelo (Elmajdub & Bhardwaj, 2014)

Tabla 2. Componentes del tubo pitot estático para aeronaves.

Componente	Descripción de funcionamiento
Tubo Pitot	Mide la presión total (estática + dinámica) mediante una abertura frontal. Esta presión se transmite al indicador de velocidad aérea (ASI) para calcular la velocidad relativa.
Puerto Estático	Captura la presión barométrica del ambiente (presión estática), utilizada por el altímetro y el indicador de velocidad vertical (VSI) para determinar la altitud y la razón de ascenso o descenso.
Indicador de Velocidad Aérea (ASI)	Calcula la diferencia entre la presión total (del tubo pitot) y la presión estática para determinar la velocidad del aire indicada.
Altímetro	Utiliza cápsulas aneroides que se expanden o contraen con la presión estática para indicar la altitud barométrica sobre el nivel medio del mar.
Indicador de Velocidad Vertical (VSI)	Mide la tasa de cambio de altitud mediante un diafragma y una fuga calibrada que genera un diferencial de presión cuando la aeronave asciende o desciende.
Fuente Estática Alterna	Fuente secundaria de presión estática ubicada generalmente en la cabina, usada si el puerto estático principal se bloquea; puede introducir errores en la lectura de los instrumentos.
Codificador (Codificador de altitud)	Convierte la lectura mecánica del altímetro en una señal eléctrica codificada que es enviada al transpondedor para reportar automáticamente la altitud al control de tráfico a

Nota. Administración Federal de Aviación, FAA, 2023.

El diseño y puesta en funcionamiento del banco de pruebas de instrumentos del sistema pitot estático y encoder de aeronaves, minimiza el impacto ambiental negativo y previene riesgos en los seres humanos y al medio ambiente, dado que aporta a la eliminación de factores ambientales de dichos riesgos, tales como sólidos, líquidos, emisiones contaminantes y ruido, dado lo anterior en ocasiones las pruebas y diagnósticos realizadas a los instrumentos del sistema pitot estático son realizadas en las aeronaves directamente, lo que lleva a que esto genere pérdidas al medio ambiente por el uso de combustible aeronáutico en vuelos de prueba, consumo de horas de vuelo operativas de las aeronaves, emisiones contaminantes derivadas del encendido y posterior vuelo y genere factores de ruido al personal que integre la tripulación, es en este aspecto del manejo ambiental, que se traduce la racionalización del uso de materiales y energía al integrar un banco de pruebas que simula las mismas condiciones de la aeronave y permite realizar diagnósticos y pruebas sin necesidad de llevar el componente a la aeronave para realizar pruebas operacionales, minimizando y mitigando los riesgos antes mencionados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Administración Federal de Aviación (2023). Manual del Piloto de Conocimientos Aeronáuticos (FAA-H-8083-25C). Departamento de Transporte de EE. UU. https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak
- Ayala, M. (6 de septiembre de 2021). Método comparativo. Lifeder. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/metodo-comparativo/>
- Department of the Army. (2024). Field maintenance manual including repair parts and special tools list (RPSTL) for helicopters, utility tactical transport (UH-60A, UH-60L) (ARMY EM 0013, TM 1-1520-237-23&P – WP 0023 Flight Instruments Description And Data).
- Elmajdub, N. F. A. B., & Bhardwaj, A. K. (2014). Important Pitot Static System in Aircraft Control System. American Journal of Engineering Research (AJER), 3(10), 138–144. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/298850588>
- Hernández, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). México: McGraw-Hill.
- Phillips, D. (s.f.). Mode A and Mode C: The straight scoop on how it works. Recuperado de http://www.aeroelectric.com/articles/Altitude_Encoding/modec.htm.
- Siemens. (2025). Análisis de elementos finitos (FEA). Siemens Digital Industries Software. Recuperado el [28 de febrero del 2025], de <https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/finite-element-analysis-fea/>
- Santos, P. M. D. (2022). Simulação Numérica da Minimização do Erro da Pressão Estática Medida na Tomada do Tecnam P2008 (Order No. 31014121). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (3059431613). <https://www.proquest.com/dissertations-theses/simulação-numérica-da-minimização-do-erro-pressão/docview/3059431613/se-2>
- Ramos Azcuy, F. J., & Guerra Breña, R. M. (2019). Introducción a los métodos estadísticos [ePub]. Editorial Universitaria. Introducción a los Métodos Estadísticos - Fridel Julio Ramos Azcuy, Rosa Mayelin Guerra Breña - Google Libros
- Tovar, G., & Figueroa, E. (2021). El helicóptero como factor decisivo para la movilidad táctica: el caso colombiano (1997-2012). Revista Científica General José María Córdova, 19(34), 309–330. <https://doi.org/10.21830/19006586.750>

Valero Gómez, YA (2024). Diseño preliminar de un sistema antibloqueo del tubo pitot estático, aplicado a la aeronave Cessna Caravan C-208 [Trabajo de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores].

**TENSIONES EN LA CONFIGURACIÓN DE LA PRAXIS
PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN PROFESIONAL
DOCENTE EN UN PROGRAMA DE LICENCIATURA EN
ESPAÑOL E INGLÉS. UNA EVALUACIÓN COMPRENSIVA
DE DEBILIDADES DE LA PRÁCTICA DESDE LA
PERSPECTIVA DE LOS ESTUDIANTES Y DOCENTES⁶¹**

**TENSIONS IN THE CONFIGURATION OF PEDAGOGICAL
PRACTICE IN PROFESSIONAL TEACHER TRAINING IN A
BACHELOR'S DEGREE PROGRAM IN SPANISH AND
ENGLISH. A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF
PRACTICE WEAKNESSES FROM THE PERSPECTIVES OF
STUDENTS AND TEACHERS**

255

Jhojan Jiménez Quintero⁶²

Jorge Oswaldo Sánchez-Buitrago⁶³

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.⁶⁴

⁶¹Derivado del proyecto de investigación: La praxis pedagógica en la formación profesional docente: Tensiones y escenarios emergentes de desarrollo en el Programa de Licenciatura en español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar.

⁶²Doctorando en Ciencias de la Educación de la Universidad del Magdalena. Docente investigador Universidad Popular del Cesar. Correo electrónico: jjimenezq@unimagdalena.edu.co.

⁶³Doctor en Educación. Docente Investigador de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. Correo electrónico: joswaldosanchez@unimagdalena.edu.co

⁶⁴Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

Este artículo devela las tensiones expresadas como debilidades, limitaciones y oportunidades de mejoramiento en el desarrollo de las prácticas pedagógicas y educativas en el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar (Colombia) que tensionan la configuración de la praxis pedagógica como categoría de análisis del proceso formativo del futuro docente. En el marco de una evaluación comprensiva de la praxis pedagógica en este programa de licenciatura como principal espacio de formación profesional del docente, se analizan las creencias, construcciones de realidades (Pintos, 2003), como también nociones, significados y sentidos que se han establecido en torno a la práctica pedagógica en este proceso formativo (Bolívar, 2019; 2021). De manera que se aborda una comprensión crítica a profundidad desde la opinión de los actores sociales, que contribuye como punto de partida para la resignificación y transformación de esta realidad social (Morin, 1990; Murcia y Jaramillo, 2008; Sánchez, 2009). Este es una investigación de naturaleza cualitativa con un enfoque histórico hermenéutico, anclada desde la complementariedad etnográfica (Murcia y Jaramillo, 2001; 2008). El estudio puso en evidencia múltiples oportunidades de mejoramiento relacionadas con la interacción en experiencias de prácticas en escenarios escolares reales, los procesos formativos y su relación con la construcción de una praxis pedagógica, y la evaluación de las experiencias de prácticas, que tensionan el desarrollo de la praxis pedagógica deseada en el futuro docente.

PALABRAS CLAVE: Práctica pedagógica y educativa, formación docente, praxis pedagógica, gestión pedagógica

ABSTRACT

This article reveals the tensions expressed as weaknesses, limitations, and opportunities for improvement in the development of pedagogical and educational practices in the Bachelor's Program in Spanish and English at the Universidad Popular del Cesar (Colombia), which strain the configuration of pedagogical praxis as a category of analysis of the training process of future teachers. Within the framework of a comprehensive evaluation of pedagogical praxis in this bachelor's degree program as the main space for professional training for teachers, beliefs and constructions of realities are analyzed, as well as notions, meanings and senses that have been established around pedagogical practice in this training process (Bolívar, 2019; 2021). Thus, a deep critical understanding is undertaken from the perspective of social actors, which serves as a starting point for the redefinition and transformation of this social reality (Morin, 1990; Murcia and Jaramillo, 2008; Sánchez, 2009). This is a qualitative research project with a historical-hermeneutic approach, anchored in ethnographic complementarity (Murcia and Jaramillo, 2001; 2008). The study highlighted multiple opportunities for improvement related to interaction in practical experiences in real school settings, training processes and their relationship with the construction of a pedagogical praxis, and the evaluation of practical experiences, which stress the development of the desired pedagogical praxis in future teachers.

Keywords: Pedagogical and educational practice, teacher training, pedagogical praxis, pedagogical management.

INTRODUCCIÓN

En la formación profesional del profesorado en Colombia que ha sido objeto de profundos cambios en los últimos años con el interés de mejorar la calidad de la educación del país, vale la pena develar debilidades, limitaciones y obstáculos en el desarrollo de la praxis pedagógica en este proceso formativo. En este marco emerge la investigación doctoral “La praxis pedagógica en la formación profesional docente: Tensiones y escenarios emergentes de desarrollo en el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar”, producto del Doctorado en Ciencias de la Educación de la Universidad del Magdalena, desde el Grupo de Investigación en Gestión Pedagógica Transformadora – GEPET, como aporte a la discusión actual sobre las políticas de calidad educativa y de formación del docente en el país.

En Colombia, las exigencias en la formación del docente se han incrementado en la última década con mayores requerimientos a los programas de licenciatura de las universidades como política educativa para garantizar el aseguramiento de la calidad de esta formación (MEN, 2015; 2016; 2017; CESU, 2020). Políticas que se han establecido en concordancia con las decisiones de las organizaciones de cooperación internacional (UNESCO, 2015; UNESCO-OREAL, 2016; UNESCO-IESALC, 2017, 2020; BID, 2018; OCDE, 2018) y sobre todo en el contexto latinoamericano buscando superar las serias dificultades en educación donde diversos estudios señalan la baja calidad de la preparación de los profesores como una de las principales limitantes (Bruns, B. y Luque, J., 2015; Marcelo y Vaillant, 2018; Vaillant y Manso, 2022).

Estas políticas educativas en la formación de maestros en Colombia otorgaron una importancia singular a la práctica en este proceso formativo, con mayor tiempo de dedicación, centrada en la reflexión crítica, privilegiando la investigación y experimentación didáctica (MEN, 2016; MEN, 2017). Se privilegia desde estos planteamientos el desarrollo de una praxis pedagógica como un actuar reflexivo que orienta el desempeño del futuro docente (Sanchez, 2009; Gutiérrez, 2002; Anijovich, 2009).

En este capítulo se cuestiona este ideal formativo al contrastarlo con la realidad social y revelar las principales limitaciones que tensionan la configuración de la praxis pedagógica

en la formación del docente. Para ello, se establece como unidad comprensiva el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar, programa de formación que surgió en el marco de estas políticas. Los resultados aportan información útil en el debate académico respecto a la apropiación conceptual, teórica y ontológica de la formación del profesorado (Sánchez, 2015; Esquea, 2017; Herrera, 2018; Bolívar, 2019).

MATERIAL Y MÉTODOS

Este es un estudio de naturaleza cualitativa con un enfoque histórico hermenéutico. Se sustenta desde el diseño etnográfico con interés crítico interpretativo para develar las características de las prácticas pedagógicas y educativas en el proceso de formación de docentes. Se buscó describir la realidad desde la perspectiva de los sujetos y sus construcciones, que emergieron en la comprensión de la complejidad del fenómeno estudiado, por lo que se apoya en el principio de complementariedad etnográfica (Murcia y Jaramillo, 2008), esto permitió captar con mayor fidelidad las distintas dimensiones subjetivas y objetivas de la realidad haciendo que los resultados de esta investigación sean más sensibles (Murcia y Jaramillo, 2008; Bonilla y Rodríguez, 2005).

La recolección y tratamiento de la información orientaron una evaluación comprensiva del desarrollo de los procesos asociados a la práctica en la formación del docente en el programa de licenciatura, como su racionalidad y sus transformaciones encaminadas a la mejora (Carr, 2002). Se develaron así las estructuras de sentido que se han consolidado en este proceso formativo y que configuran los modos de teorizar, como los modos de actuar de docentes y futuros docentes (Saldarriaga, 2003). Por ello, se analiza a profundidad el relato de la realidad, pero también las ausencias, lo preterido, las contingencias. Por esta razón, se acudió al metacódigo relevancia/opacidad para describir la realidad que construyen los actores sociales (Pintos, 2003).

La unidad comprensiva es el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar. Programa de formación de docentes que se desarrolla bajo la modalidad presencial en la ciudad de Valledupar (UNICESAR, 2017).

Actores sociales. Docentes y estudiantes del programa de licenciatura que cursaron las asignaturas de prácticas pedagógicas y educativas, y que de manera voluntaria decidieron participar; además del investigador, docente del programa, cuya experiencia personal aporta en la construcción de sentido en la investigación (Strauss y Corbin, 2002). Los actores sociales se seleccionaron teniendo en cuenta los criterios de selectividad y voluntariedad de acuerdo con la intencionalidad de la investigación (Flick, 2015). Con base en ello, se describen a continuación los tipos de participantes y las decisiones de selección:

Tabla 1. Criterios para la selección de actores sociales en la investigación.

TIPO DE ACTOR SOCIAL	CRITERIOS DE SELECTIVIDAD
Docente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Experiencia como docente del programa de licenciatura. 2. Orienta asignaturas de práctica pedagógica y educativa en el programa de licenciatura. 3. Experiencia en el desarrollo y orientación de prácticas pedagógicas en la licenciatura. 4. Compromiso con los valores institucionales del programa.
Estudiante	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estudiante activo del programa de licenciatura. 2. Cursa actualmente asignaturas de práctica pedagógica y educativa en el programa de licenciatura. 3. Compromiso con los valores institucionales del programa.

Fuente: Elaboración propia.

Como este estudio está orientado por una evaluación comprensiva de la praxis pedagógica en los estudiantes del Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar, se tuvo la precaución de seleccionar informantes de cada una de las asignaturas de prácticas del programa. Para ello, se tuvo en cuenta estudiantes y docentes que participaron de cada de estas asignaturas el semestre inmediatamente anterior. Se logró conformar un universo de 96 actores sociales distribuidos así:

Tabla 2. Distribución de actores sociales participantes por asignatura.

ASIGNATURA	SEMESTRE	ESTUDIANTES	DOCENTES
Práctica Pedagógica y Educativa de Observación I	II	8	6
Práctica Pedagógica y Educativa de Observación II	III	8	3
Práctica Pedagógica y Educativa de Obs. III	IV	5	2
Práctica Pedagógica y Educativa de Formación I	V	7	2
Práctica Pedagógica y Educativa de Formación II	VI	9	4
Práctica Pedagógica y Educativa de Formación III	VII	1	1
Práctica Pedagógica y Educativa Profesional I	VIII	8	8
Práctica Pedagógica y Educativa Profesional II	IX	5	7
Práctica Pedagógica y Educativa Profesional II	X	7	5
Total de actores sociales participantes		58	38
Total		96 participantes	

Fuente: Elaboración propia.

Técnicas e instrumentos. Para el desarrollo de este estudio se utilizaron técnicas e instrumentos de recogida de información de acuerdo con el interés investigativo, que permitieran la obtención de datos relevantes y pertinentes para la indagación (Latorre, 2005). Se hizo uso de observación participante, para recoger información que permitió conocer desde adentro de la realidad sociocultural estudiada (Sandoval, 1996; Colás, 1998), cuestionarios individuales y entrevistas semiestructuradas, como medios para conocer las opiniones y sentir de las personas sobre los hechos y captar las experiencias y significados que construyen los sujetos (Colás, 1998; Murillo y Martínez, 2010; Kvale, 2011).

A cada actor social se le formuló las mismas preguntas que se construyeron de acuerdo a cada intencionalidad investigativa. Estas buscan obtener las opiniones, percepciones y construcciones de los sujetos a través de sus respuestas abiertas.

Tabla 3. Preguntas de investigación aplicadas a actores sociales de la investigación.

N.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	INTENCIONALIDAD INVESTIGATIVA
1	¿Cuáles fueron las principales fortalezas o aspectos positivos destacables de la Práctica Pedagógica y Educativa?	Evaluar comprensivamente el proceso formativo del programa de licenciatura en relación al desarrollo de prácticas pedagógicas y educativas en la formación del futuro docente.
2	¿Cuáles fueron las principales debilidades o aspectos por mejora que se evidenciaron en la Práctica Pedagógica y Educativa?	Establecer los niveles de convergencia y divergencia entre la praxis pedagógica que están configurando los estudiantes en formación y los ideales formativos propuestos por el programa.
3	¿Cuáles son los principales aportes o contribuciones que se evidenciaron en esta Práctica Pedagógica y Educativa para el logro y consolidación del perfil de formación que se	Analizar los principales desafíos en la configuración de la praxis pedagógica del docente en formación con relación a las políticas de calidad, la revisión crítica de los fundamentos

	pretende alcanzar en la Licenciatura en Español e Inglés?	epistemológicos y la comprensión de las problemáticas asociadas al desarrollo del programa de licenciatura.
4	¿Cuáles son las principales recomendaciones, sugerencias de mejora o innovación, que usted considera que se deben implementar para el fortalecimiento de la Práctica Pedagógica y Educativa?	Proponer ajustes, complementaciones, reorientaciones curriculares, didácticas y evaluativas, que se incorporen como rutas para el mejoramiento en perspectiva de la alta calidad del programa de licenciatura.

Fuente: Elaboración propia.

Cada actor social respondió las preguntas que se presentó en un formulario digital que permitió la recolección del material empírico. Para este capítulo, referido a la comprensión de las debilidades y aspectos de mejora que se han destacado en la configuración de la praxis pedagógica en la formación del profesorado, se consideraron únicamente las respuestas que los actores sociales dieron a la segunda pregunta formulada.

Por otro lado, también se hizo uso de análisis documental utilizado para contrastar la información y develar intereses y perspectiva desde lo instituido en la comprensión de la realidad (Sandoval, 1996; Strauss y Corbin, 2002). Se consideraron como fuentes de información el Proyecto Educativo Institucional de la Universidad Popular del Cesar, el Proyecto Educativo del Programa de Licenciatura en Español e Inglés, el Documento Maestro para la solicitud de registro calificado del programa y los diseños curriculares de las asignaturas relacionadas a las prácticas pedagógicas y educativas en el programa.

262

RESULTADOS

Se describen a continuación las debilidades y aspectos por mejorar que tensionan el desarrollo de la praxis pedagógica en la formación del docente en el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar. Estos hallazgos se enuncian siguiendo los distintos momentos de la complementariedad etnográfica (Murcia y Jaramillo, 2008).

Preconfiguración de las debilidades en el desarrollo de la praxis pedagógica en la formación docente. En este apartado, se presentan las debilidades y dificultades que se evidenciaron en la comprensión de la preestructura cultural que se ha construido en torno a la praxis pedagógica en la formación del docente en el Programa de Licenciatura en Español

e Inglés. El análisis de contenido contrastado con la opinión de los actores, en una primera etapa de indagación, y a la luz de los fundamentos teóricos que posicionaron esta investigación, permitió identificar las precategorias conceptuales que emergieron del estudio.

Tabla 4. Relación de categorías en la preestructura conceptual sobre debilidades en la configuración de la praxis pedagógica en al formación del docente.

Debilidades y aspecto a mejorar identificados en el desarrollo de la praxis pedagógica en estudiantes del Programa de Licenciatura en Español e Inglés	
Precategorías identificadas	Descripción
<i>Tensiones en la relación practicante – profesores de prácticas</i>	
Escasa apropiación del modelo pedagógico institucional	Denota la poca apropiación del modelo pedagógico adoptado en el programa que fundamenta la relación docente – estudiante en el proceso de formación.
La teoría como precedente a la práctica	Referida a la limitada tendencia tradicionalista en educación de situar la práctica como consecuencia de procesos teóricos.
<i>Tensiones en la relación practicante – gestión de las prácticas</i>	
Evaluación de la práctica	Se refiere a los procesos, estrategias, recursos e instrumentos empleados para la evaluación que tensionan el desarrollo de la praxis.
Asignación de escenarios de prácticas	La selección, distribución y asignación de escenarios de prácticas se distingue como una limitante en el proceso formativo.
<i>Tensiones en la relación practicante – contextos escolares</i>	
Poco trabajo de campo	Referido al limitado desarrollo de experiencias en contextos escolares reales en los primeros ciclos de prácticas.
Necesidades en los escenarios de prácticas	Se refiere a las condiciones físicas, tecnológicas y sociales en los contextos escolares donde se desarrollan las prácticas.
<i>Tensiones en la relación practicante – docentes de aula</i>	
Poco trabajo colaborativo	Se identifica la escasa participación de pares en el proceso formativo.
Dificultades en la interacción con docentes de aula	Referido a las tensiones, limitaciones y desafíos que se evidencian entre practicantes y docentes de aula en los escenarios escolares de práctica.

Fuente: Elaboración propia.

Estas precategorias identificadas ponen en evidencia que las debilidades y desafíos en la configuración de la praxis pedagógica en la formación del docente en el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar, se presentan en función de los diferentes escenarios en los que se relaciona el estudiante de licenciatura. Por un lado,

desde el escenario propiamente formativo, al interior del programa y la Universidad, al reconocer las tensiones que se suscitan en la relación con sus docentes de prácticas y con los procesos de cómo se desarrolla y gestiona la práctica en el programa. Por otro lado, desde un ámbito externo se devela aquí como un escenario de múltiples tensiones, la manera cómo se concreta la relación del practicante del programa con los contextos escolares donde desarrolla sus prácticas y con los docentes de aula con quienes interactúa en este proceso formativo como par académico.

Por otro lado, el Proyecto Educativo del Programa – PEP (UNICESAR, 2016) con apego al Proyecto Educativo Institucional – PEI de la Universidad, señala que el proceso formativo que se desarrolla se fundamenta en el modelo pedagógico cognitivo contextual constructivista, modelo que se caracteriza por situarse en el aprendizaje del estudiante, en cómo desarrolla sus competencias, en cómo consolida sus desempeños, genera conocimientos, transforma sus prácticas sociales, dando cuenta del nivel de complejidad superior y de autonomía y participación social (UNICESAR, 2016). Sin embargo, no se evidencia desde la lectura de estos documentos en una comprensión de la preestructura cultural relacionada con la configuración de la praxis pedagógica en la formación del docente, una construcción epistémica amplia ni una ruta metodológica clara de los procesos formativos desde la perspectiva del modelo pedagógico adoptado.

De manera que desde esta preconfiguración de la realidad (Murcia y Jaramillo, 2001), podría considerarse que la poca apropiación del modelo pedagógico institucional (UNICESAR, 2016) ha contribuido a que se presenten estos desafíos expresados como tensiones en la configuración de la praxis pedagógica en la formación docente en este programa de licenciatura.

Esta comprensión inicial de las debilidades y aspectos por mejorar deja claro que la configuración de la praxis pedagógica en la formación del futuro docente responde a diversos factores que influyen en la manera cómo percibe la realidad, cómo construye sus nociones, cómo consolida su saber pedagógico (Saldarriaga, 2015) y cómo acumula experiencias que le dan forma a su identidad docente a través de la práctica (Contreras, 2010; 2011). En este proceso, indiscutiblemente, el desarrollo de estas asignaturas debe superar la perspectiva instrumental y prospectiva que tradicionalmente se le atribuye (Esquea, 2017) y que

desafortunadamente se ha arraigado en el contexto educativo y que, si se pretende una praxis pedagógica, emancipadora, crítica, como cualidad del docente (Sánchez, 2009), se hace necesario reconocer las limitaciones para su mejoramiento.

Configuración de las debilidades identificadas en la praxis pedagógica en la formación docente. En el marco de la complementariedad etnográfica en este segundo momento se establecen las relaciones de sentido de la realidad en la comprensión de la práctica pedagógica en la formación de docentes (Murcia y Jaramillo, 2008). De manera que se pudo establecer nuevas comprensiones con mayor profundidad para identificar nuevas relaciones a partir de la teoría sustantiva y la teoría formal, e identificar así nuevas relaciones hermenéuticas a través de las cuales se acotó con mayor precisión el objeto de estudio (Buendía et al., 1998; Rodríguez et al., 1999; Strauss y Corbin, 2002; Martínez M., 2007).

En esta etapa se tuvo en cuenta la opinión de estudiantes y docentes en un nuevo ciclo de recogida de material social, obteniendo así unidades semánticas que estructuraron el corpus de este análisis. A partir de los datos, se realizó una codificación abierta donde se agruparon las unidades semánticas más recurrentes que permitieron develar las cualidades que más se destacan de la práctica pedagógica en este programa de licenciatura. En esta codificación se establecieron asociaciones a fin de identificar en ella conceptos, propiedades y dimensiones (Strauss y Corbin, 2002).

Tabla 5. Relación de unidades semánticas sobre debilidades en la praxis pedagógica en la formación del docente obtenidas por tipo de actor social participante.

INFORMANTES	UNIDADES SEMÁNTICAS OBTENIDAS
38 Docentes	54
58 Estudiantes	91

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar las respuestas de los informantes, los desafíos que presentó la configuración de la praxis pedagógica en la formación del profesorado varían de acuerdo con los ciclos de prácticas que han cursado, conforme se indica en la tabla:

Tabla 6. Listado de códigos con mayor recurrencia en análisis de debilidades en la praxis pedagógica en respuestas de actores sociales para el ciclo de Prácticas Pedagógicas y Educativas de Observación.

CICLO DE PRÁCTICA	CÓDIGOS CON MAYOR RECURRENCIA EN RESPUESTAS DE ESTUDIANTES	CÓDIGOS CON MAYOR RECURRENCIA EN RESPUESTAS DE DOCENTES
Ciclo de Prácticas Pedagógicas y Educativas de Observación I, II, III	Poca cualificación del docente de prácticas	Poco trabajo de campo.
	Poco trabajo de campo.	Necesidad del reconocimiento de la diversidad de contextos escolares.
	Exceso de bibliografía de apoyo	Restricciones para el acceso a escenarios escolares.
	Práctica basada solo en lectura de textos académicos	Dificultades en la organización de la práctica.
	Programación de experiencias en campo en horarios no asignados	Ausencia de guías de práctica

Fuente: Elaboración propia.

En el primer ciclo de prácticas, denominados Prácticas Pedagógicas de Observación I, II y II, en los estudiantes practicantes predominó la insatisfacción por las estrategias pedagógicas y didácticas empleadas en el desarrollo de las prácticas, como también el desarrollo de la asignatura de prácticas con pocas experiencias en el contexto real escolar.

Es una debilidad de la asignatura que solo se haga una ida a la institución y ya sea al final de semestre (Informante 4. Estudiante, práctica de observación I).

Las idas a los colegios, me refiero a que vamos a ser docentes y necesitamos las experiencias de la vida real, solo fui 2 veces en todo el semestre porque no nos dieron más permisos y eso nos puede afectar, porque no todo es teoría (Informante 11. Estudiante, práctica de observación II).

En la opinión de los docentes se reconoce, igualmente, el poco trabajo de campo como la limitación más marcada de este ciclo de prácticas, siendo consistentes con el sentir de los estudiantes. Esto evidenció dificultades estructurales que no solo obedecen al desarrollo pedagógico de los docentes, sino que estriban en los planteamientos curriculares de estas asignaturas.

Los referentes teóricos en su mayoría son trabajos de investigación de otros países y aunque dialoguen con la realidad de Latinoamérica y Colombia en ocasiones se aleja (Informante 68. Docente, práctica de observación III).

Los textos a pesar de ser texto muy informativos e importantes eran muy largos llegaba un punto donde todos pierden el hilo conductor, para al fin y al cabo terminar diciendo lo mismo y llegar a la realidad educativa actual (Informante 15. Estudiante, práctica de observación II).

Los datos sugieren que la fundamentación teórica, los textos académicos, las lecturas complementarias y la bibliografía recomendada en cada asignatura de este ciclo de prácticas están generando tensión en el proceso formativo. Si bien es cierto que estas asignaturas buscan posicionar “la observación como estrategia pedagógica” (UNICESAR, 2016), es poco claro el desarrollo procedimental de esta. No se identifica en los documentos que orientan el programa como en los diseños curriculares, las estrategias, procesos, recursos didácticos, entre otros, para abordar la observación en función del desarrollo de una praxis pedagógica.

Por otro lado, a pesar de que el diseño curricular de estas asignaturas está orientado al aprendizaje basado en la experiencia, congruentes con el modelo pedagógico institucional (UNICESAR, 2016), en concordancia con lo establecido en las políticas de formación (MEN, 2015; 2016) y el presupuesto teórico que fundamentan estas prácticas (Shön, 1998; Herrera y Martínez, 2018; Esquea, 2017; Bolívar, 2019), estudiantes y docentes dieron testimonio de un limitado desarrollo de experiencias que ponga en diálogo estas perspectivas.

La evidencia sugiere que en el desarrollo de estas asignaturas prevalece la tendencia de darle prioridad al componente teórico, a la información académica, antes que el aprendizaje desde la práctica, privilegiando un posicionamiento instrumentalista de la práctica en la formación del profesorado que impide el desarrollo de la reflexión crítica esperada (Esquea, 2017; Bolívar, 2019).

En cuanto a los aspectos a mejorar, sería exactamente el tiempo de exploración o el trabajo de campo que realizan los estudiantes, ya que si se les permite observar la mayor cantidad de clases posibles llegarían a la asignatura de formativa con mayor seguridad frente al que hacer docente (Informante 69. Docente, práctica de observación III).

En ese sentido, los códigos con mayor recurrencia que se presentan en este ciclo de prácticas develan que en el desarrollo de estas asignaturas existen obstáculos para alcanzar el ideal formativo propuesto (UNICESAR, 2016; MEN, 2016, 2017). Además, estos datos demostraron que muy poco se consolidó una observación sistemática, rigurosa, como base

de la indagación y que se constituye en un recurso valioso para la reflexión crítica que sustenta la praxis del futuro docente (Sánchez, 2009, Gutiérrez, 2013).

Desde una perspectiva sociológica, estos vacíos, ausencias y limitaciones develan una construcción social que se ha tejido en torno a la práctica en la formación docente (Pintos, 2015). En ese sentido, estas prácticas aún no logran superar el enfoque instrumentalista de la práctica que se ha enquistado en los escenarios de formación, donde se privilegia la teoría sobre la práctica, reduciéndolo a un carácter prescriptivo que poco contribuye al proceso formativo (Esquea, 2017), que dificulta la construcción del saber desde la experiencia, de darle sentido a lo vivido desde la relación educativa (Contreras, 2013).

Para el segundo ciclo de prácticas, conformada por las asignaturas de Prácticas Pedagógicas y Educativas de Formación I, II y III, la percepción de los sujetos fue distinta al indagárseles por las debilidades o aspectos por mejorar. Dado que para el desarrollo de estas prácticas el estudiante de la licenciatura realiza sus prácticas pedagógicas en contextos reales escolares (MEN, 2016; UNICESAR, 2016), son otras las necesidades, vacíos y preocupaciones que tensionan la praxis pedagógica en la formación del docente.

Tabla 7. Listado de códigos con mayor recurrencia en análisis de debilidades en la praxis pedagógica en respuestas de actores sociales para el ciclo de Prácticas Pedagógicas y Educativas de Formación.

CICLO DE PRÁCTICA	CÓDIGOS CON MAYOR RECURRENCIA EN RESPUESTAS DE ESTUDIANTES	CÓDIGOS CON MAYOR RECURRENCIA EN RESPUESTAS DE DOCENTES
Ciclo de Prácticas Pedagógicas y Educativas de Formación I, II, III	Dificultades en la organización de la práctica.	Dificultades en la organización de la práctica.
	Evaluación negativa de la interacción con docentes de aula.	Dificultades con la consecución de escenarios de prácticas.
	Poco compromiso de docentes de aula.	Carencia de aulas de clase en la universidad.
	Falta de comunicación con docentes de aula	Poco trabajo de campo.
	Poca cualificación del docente de prácticas.	Material bibliográfico poco pertinente.

Fuente: Elaboración propia.

Para este ciclo, la información social analizada puso en evidencia debilidades relacionadas con la gestión de las prácticas mismas, las experiencias en escenarios escolares y la interacción de los practicantes con los docentes de aula. A diferencia de las prácticas de observación en las que se cuestionó la relación entre el docente de práctica y el practicante, en este ciclo la preocupación se sitúa en la relación del practicante con los escenarios de prácticas.

En la opinión de los estudiantes existe una alta preocupación por la manera como se organizan, desarrollan y evalúan los procesos de prácticas de formación. Para este ciclo, se organizan grupos de diez practicantes aproximadamente por docente, las asignaturas tienen un tiempo de dedicación de ocho horas semanales, de las cuales una parte de este tiempo el practicante las desarrolla en la universidad en procesos de planeación, diseño pedagógico, reflexión y evaluación de la práctica, y el otro tiempo en prácticas al interior de aulas en contextos escolares reales que no superan las dos horas de clases directas. Se ha establecido que cada práctica de este ciclo aborda una disciplina de enseñanza del lenguaje distinta, así: Prácticas Pedagógicas y Educativas de Formación I, enseñanza de la literatura; Prácticas Pedagógicas y Educativas de Formación II, enseñanza del Inglés; Prácticas Pedagógicas y Educativas de Formación III, enseñanza de la lengua castellana (UNICESAR, 2016).

269

Esta estructura organizativa de las prácticas en este ciclo ha presentado algunas dificultades a juicio de los estudiantes. Consideran que han sido limitadas las experiencias en contextos escolares, que, a pesar del tiempo semanal dispuesto para las prácticas, los espacios de experiencias reales son proporcionalmente insuficientes, lo que afecta la configuración de sus saberes a partir de la experiencia práctica (Contreras, 2011; Herrera y Martínez, 2018).

En cuanto a los aspectos a mejorar, sería exactamente el tiempo de exploración o el trabajo de campo que realizan los estudiantes, ya que si se les permite observar la mayor cantidad de clases posibles llegarían a la asignatura de formativa con mayor seguridad frente al que hacer docente (Informante 69. Docente, práctica de observación III).

Por otro lado, señalan que los escenarios de prácticas son insuficientes para la cantidad de practicantes. La distribución cada semestre de estudiantes practicantes en los colegios seleccionados como centros de prácticas es una dificultad latente. Esta situación se

agudiza al asignar los espacios de docencia directa en estas prácticas, pues hacer coincidir escenarios de prácticas, horarios de asignaturas en aulas, con el horario asignado al estudiante practicante es difícil. Aún más, si se tiene en cuenta que al amparo de la autonomía curricular (Ley 115 de 1994), cada colegio como centro de práctica tiene horarios, intensidad horaria de las asignaturas y diseños curriculares, distintos. Esta situación ha desencadenado tensiones que los estudiantes y docentes de prácticas han presentado.

La falta de espacios para poder iniciar las prácticas, es decir, los convenios que maneja la universidad con algunos colegios a veces no quieren recibir a los practicantes. También, los docentes de los colegios, no les gusta "perder el tiempo" con los docentes practicantes y no permiten los espacios en las aulas o en los horarios que corresponde (Informante 32. Estudiante, práctica de formación II).

Desde la experiencia en los contextos escolares, también se logró identificar dificultades en la interacción con los docentes de aulas. Si bien es cierto que el docente de aula es el docente que orienta las asignaturas en los colegios o escuelas y brinda el acompañamiento y colaboración mutuas en la formación del practicante (UNICESAR, 2016), se evidencia inconformidades y limitaciones en la opinión de los estudiantes, que se develan una evaluación negativa de la interacción con los docentes de aula y poco compromiso en el proceso formativo del practicante.

Sin duda la principal debilidad fue la falta de compromiso por parte de los docentes de la institución educativa asignada, ya que siempre estuvieron muy indiferentes con los practicantes, nunca respondían llamadas, mensajes y no cumplían con lo acordado, una relación recíproca en la que ellos nos ayudaban a nosotros y nosotros a ellos (Informante 22. Estudiante, práctica de formación I).

Desde la perspectiva de los docentes, la información social pone en evidencia similitudes con lo descrito en estudiantes de la licenciatura. Los datos recogidos develan la insatisfacción por la manera como se ha desarrollado la gestión de las prácticas, manifestando inconformidades relacionadas con la distribución de los escenarios de prácticas, los espacios para desarrollar los encuentros de seguimiento de la práctica en la Universidad, como las dificultades y carencias en los escenarios de prácticas:

Seguir generando más espacios para fomentar la práctica formativa, que los establecimientos educativos, elegidos por la universidad le garanticen al docente practicante que su acercamiento al aula se realizará de forma efectiva y pondrá a prueba sus conocimientos, hay

escuelas que no ofrecen lo necesario para esta realización de las prácticas (Informante 71. Docente, práctica de formación I).

Llama la atención que, en los dos ciclos de prácticas analizados, no se hizo referencia a limitaciones y dificultades respecto al desarrollo de la reflexión sobre la práctica como aspecto esencial del proceso de práctica. Dado que la reflexión en la formación del profesorado es objeto de discusión por las tensiones que suscitan su implementación, manejo, evaluación y seguimiento (Bolívar, 2021), al parecer en el desarrollo de estas asignaturas este proceso se desarrolla de la forma esperada. Desde la perspectiva de una construcción de sentido (Pintos, 2015), podría afirmarse que esta ausencia develaría que respecto a los procesos reflexivos en la formación del profesorado se carece de un proceso riguroso y sistemático de seguimiento, desaprovechando la importancia de la práctica reflexiva para enriquecer la formación del profesorado (Zeilcher, 1993).

Para el caso del último ciclo de prácticas, la comprensión de la realidad desde la perspectiva de los actores sociales varió de acuerdo a las intenciones formativas de esta etapa, pues son prácticas que se desarrollan con docencia directa en su totalidad y con énfasis en procesos investigativos que emergen de su propia práctica (UNICESAR, 2017). De manera que los procesos asociados al desarrollo de prácticas en docencia directa, su vinculación es escenarios escolares y los procesos relacionados al trabajo investigativo desde la práctica, fueron las mayores preocupaciones identificadas.

Tabla 8. Listado de códigos con mayor recurrencia en análisis de debilidades en la praxis pedagógica en respuestas de actores sociales para el ciclo de Prácticas Pedagógicas y Educativas Profesionales.

CICLO DE PRÁCTICA	CÓDIGOS CON MAYOR RECURRENCIA EN RESPUESTAS DE ESTUDIANTES	CÓDIGOS CON MAYOR RECURRENCIA EN RESPUESTAS DE DOCENTES
Ciclo de Prácticas Pedagógicas y Educativas Profesional I, II, III	Dificultades con la consecución de escenarios de prácticas.	Falta de capacitación y supervisión de las prácticas.
	Falta de comunicación en los procesos de la prácticas.	Dificultades para el desarrollo del proceso investigativo en la práctica.
	Ausencia de apoyo económico para los practicantes.	Falta de comunicación en los procesos de la prácticas.

	Carencias en el escenario de prácticas.	Poco compromiso de los estudiantes de licenciatura.
	Poca cualificación del docente de prácticas.	Dificultades con la consecución de escenarios de prácticas.

Fuente: Elaboración propia.

La apreciación de los estudiantes señaló como dificultades más relevantes en este ciclo de prácticas las relacionadas con los escenarios de prácticas, sus necesidades y carencias en los mismos. El desarrollo de estas asignaturas consecutivas de prácticas profesionales, con docencia directa de forma exclusiva, con énfasis en investigación pedagógica donde concluyen con el trabajo de grado que surge desde la práctica, son características de este ciclo que influyeron significativamente en el estudiante de la licenciatura.

Fueron reiterativos en afirmar que la asignación de los centros de prácticas genera múltiples tensiones. Los mecanismos de selección de los colegios como escenarios de prácticas, su ubicación, las necesidades y limitaciones que tienen puesto que la mayoría son instituciones educativas públicas, se evidenciaron como las preocupaciones más latentes.

Gestionar la selección de colegios con tiempo para que, de esta forma, pudiésemos observar desde el vortal las instituciones disponibles, nunca fue atendida. Como resultado, han sido tres prácticas (un año y medio) transportándonos a lugares excesivamente lejanos y en contextos sumamente peligrosos (Informante 48. Estudiante, práctica profesional II).

Por otro lado, se destacó desde la perspectiva de los estudiantes la inconformidad de los procesos de gestión, organización y evaluación de las prácticas en este ciclo. Señalaron que la falta de comunicación, como dificultades en la supervisión y seguimiento, generaron tensiones que se deben superar, que se contraponen a los ideales formativos como a las rutas de desarrollo de las prácticas establecidas en los documentos oficiales (UNICESAR, 2016; 2017).

Considero que al finalizar la práctica por problemas de comunicación entre la institución educativa y la universidad se dio una despedida traumática para los estudiantes, los docentes titulares y los practicantes (Informante 55. Estudiante, práctica profesional III).

Estas situaciones descritas evidencian rupturas, ausencias y vacíos en el escenario real de desarrollo que lo tensionan que distancian del escenario ideal de formación (UNICESAR, 2017). Esto hace necesario implementar estrategias para superarlas y encauzar la formación del docente de Español e Inglés desde la praxis pedagógica, reflexiva, consciente, sistemática y emancipadora (Sánchez, 2009).

Otra situación no menos importante en la experiencia de los estudiantes da cuenta de las limitaciones, carencias y riesgos que cotidianamente padecen los estudiantes y pusieron de manifiesto. La ausencia de un apoyo económico que mitigue los gastos de traslado a los centros de prácticas, las necesidades en infraestructura física y tecnológica, como la poca colaboración de los docentes de aulas y directivos docentes de los centros de práctica, desalientan el desarrollo de estas prácticas, según lo evidenciado en la percepción de los estudiantes.

Se evidenció la falta de apoyo por parte de algunos docentes titulares, quienes delegaban todas las responsabilidades del salón de clases en los practicantes y se retiraban sin brindar el acompañamiento necesario (Informante 41. Estudiante, práctica profesional I).

Desde la perspectiva de los docentes del ciclo de las prácticas profesionales de este programa de licenciatura, las debilidades manifestadas podrían comprenderse, por un lado, a partir de la gestión, seguimiento y evaluación de las prácticas; como por las interacciones en los escenarios de prácticas.

En el análisis de las respuestas de los docentes, fueron más recurrentes las insatisfacciones que resaltaron la falta de capacitación, supervisión y evaluación de las prácticas, limitada comunicación, como insatisfacción por la asignación de los escenarios de prácticas, sus condiciones de trabajo en estos espacios, como también por el manejo administrativo de estas prácticas, que dificultan el desarrollo de la praxis deseada.

Personalmente considero que una de las debilidades ha sido la poca comunicación con los docentes de las prácticas que anteceden la práctica profesional, ya que a la hora de los estudiantes llegan a la práctica profesional I llegan con muchos vacíos que se supone debían ser corregidos o tenidos en cuenta en esas asignaturas (Informante 78. Docente, práctica profesional I).

Junto con estas dificultades se destacó también lo referido a la formación investigativa y la transición entre las prácticas que los docentes denotan como una limitante. Para ellos,

la asignación de distintos escenarios en cada una de las prácticas obstaculiza el proceso investigativo:

Entre las debilidades se evidencia dificultad por los cambios en los escenarios educativos entre la transición de un nivel escolar a otro. Lo anterior, dificulta la aplicación de la propuesta de investigación. Se debe mejorar el aspecto de gestión de aula (Informante 83. Docente, práctica profesional I).

Desde el análisis y comprensión de las interacciones de los estudiantes de la licenciatura en los escenarios de prácticas, los docentes destacaron que falta mayor compromiso de los practicantes para asumir las distintas tareas en el rol docente, como el proceso de reflexionar y cuestionar su propia práctica para mejorarla, como lo señala un profesor de prácticas: “falta bagaje a la hora de formular un proyecto y todo lo que con lleva este proceso” (Informante 80. Docente, práctica profesional I).

Respecto a la reflexión sobre la práctica que se sustentan como ideal formativo (UNICESAR, 2016), no se mencionan de forma directa y expresa debilidades. Sin embargo, las inconformidades y limitantes expresadas en torno al desarrollo de los procesos investigativos en los actores sociales dan cuenta de que este aspecto presenta tensiones que requieren ser tratadas.

El principal aspecto que se debe mejorar es el relacionado con los proyectos ya que la mayoría de los estudiantes llegan a esta última práctica sin un asesor oficial y durante los distintos momentos van cambiando de escenarios interrumpiendo sus avances (Informante 96. Docente, práctica profesional III).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para esta evaluación comprensiva de las debilidades en la configuración de la praxis pedagógica en la formación del profesorado se analizaron los resultados a la luz de los fundamentos epistémicos que permitan consolidar los hallazgos. Con ello se alcanza una reconfiguración de la realidad como análisis crítico a profundidad que permite una redimensión de nuevas significaciones de las categorías que se estudian (Murcia y Jaramillo, 2008; Murcia, 2019). Esta es una construcción que emerge de los datos donde a partir de la discusión de la teoría formal y la teoría sustantiva, se robustece y afianza la comprensión de

la praxis pedagógica en la formación del docente en el Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar (Strauss y Corbin, 2002).

Si bien se han identificado dificultades, limitaciones y vacíos que distinguen cada ciclo de prácticas, se logró inferir desde el análisis documental y del material social, que estas se establecen a partir de dos perspectivas claramente definidas: desde la gestión de la práctica, como proceso formativo al interior del programa; como desde la interacción en los escenarios de práctica, de manera externa, en relación interinstitucional del programa, la Universidad y el sector productivo (UNICESAR, 2016).

Vacíos, tensiones y limitaciones de la gestión de la práctica. La gestión es una disposición que implica planeación, dirección y seguimiento estratégicos para el logro de metas de calidad en las organizaciones educativas (Sánchez, 2010; Sánchez, Bertel y Vilorio, 2021; Albarracín y Sánchez, 2022). La gestión de la práctica se concibe desde esta lógica como la manera de organizar, orientar, administrar y manejar las prácticas pedagógicas y educativas en el programa de licenciatura, estableciendo las estrategias para alcanzar los fines formativos propuestos (UNICESAR, 2016). Sin embargo, esta evaluación comprensiva de las debilidades en la configuración de la praxis pedagógica en la formación del docente en este programa de licenciatura en Español e Inglés, expone debilidades y vacíos que tensionan este proceso formativo.

En los diferentes ciclos de la práctica, estudiantes como docentes, presentan como debilidades más significativas de este proceso formativo situaciones relacionadas con la gestión de la práctica. Las dificultades en la asignación de los escenarios de práctica, las condiciones de los mismos, la programación de experiencias en horarios distintos al asignado, entre otros, ponen de manifiesto las dificultades en la planeación y organización estratégica de las prácticas, la disponibilidad de escenarios y el manejo apropiado de las mismas. Estas dificultades conllevan a que el proceso de prácticas, antes de ser un escenario de aprendizaje (MEN, 2016, Herrera y Martínez, 2018), se convierta en un escenario de tensión que afecta el desarrollo de las competencias del futuro docente (Bolívar, 2023).

Por otro lado, la comunicación clara, asertiva y eficiente en los procesos de práctica parece ser otra dificultad en la gestión de la práctica. Si bien es cierto que el programa cuenta con una estructura orgánica, una ruta de atención de los procesos de prácticas y una

evaluación permanente de las prácticas pedagógicas y educativas (UNICESAR, 2016), para los docentes y estudiantes es insuficiente, pues ponen de manifiesto fracturas en la manera como fluye la comunicación.

La comunicación con los docentes titulares fue la mayor debilidad que se pudo evidenciar, esto debido a que nunca se respetaban los tiempos acordados desde el primer día entre los docentes practicantes y los docentes titulares (Informante 25. Estudiante, práctica de formación I).

Estas impresiones de los actores sociales son construcciones sociales que describen la realidad cotidiana, pero al mismo tiempo sus necesidades, sus ausencias, que dan sentido a sus prácticas sociales (Pintos, 2015). Cobra importancia en un escenario así, una resignificación de la gestión de la práctica como modo de abordar las dificultades y tensiones que enfrenta, reconociendo las características sociales del contexto (Sánchez, 2010; Ortiz y Sánchez, 2022), orientado por un liderazgo pedagógico que propicie un actuar reflexivo, dialógico, participativo que pueda transformar las realidades (Sánchez, 2009; Sánchez, Bertel y Vilorio, 2021).

Restricciones de la reflexión en la investigación pedagógica. Otra marcada dificultad que emerge de los datos está referida a las características de la reflexión como insumo de la investigación pedagógica. El rigor científico es considerado como un aspecto de suma importancia en el proceso formativo de la universidad (UNICERSAR, 2016I), y una cualidad sustancial en la formación docente en el programa de Licenciatura en Español e Inglés, donde la reflexión crítica se constituye en el espacio privilegiado para la producción científica (UNICESAR, 2017), característica de formación que se asocia a la tendencia de la práctica reflexiva como la mejor alternativa para la formación docente (Shön, 1998; Sánchez, 2009; Bolívar, 2021).

La reflexión es vital en la formación profesional y un factor clave que hace de la práctica un escenario prolífico. En el campo específico de la formación en este Programa de Licenciatura en Español e inglés, la reflexión inherente en las asignaturas de prácticas pedagógicas y educativas las nutre como un escenario de aprendizaje (Herrera y Martínez, 2018), donde se fortalece el saber pedagógico a partir de la experiencia (Contreras, 2010; 2011;2013; Saldarriaga, 2016).

Desde la voz de los docentes, el análisis de los datos muestra que prevalecen preocupaciones en torno a los procesos asociados a la producción académica a partir de la práctica en los estudiantes.

El principal aspecto que se debe mejorar es el relacionado con los proyectos ya que la mayoría de los estudiantes llegan a esta última práctica sin un asesor oficial y durante los distintos momentos van cambiando de escenarios interrumpiendo sus avances. (Informante 96. Docente, práctica profesional III).

A pesar de que los documentos que orientan el programa establecen las características, condiciones y desempeños para el desarrollo de las prácticas (UNICESAR, 2016; 2017), no se establecen los mecanismos de seguimiento y evaluación de la reflexión en estas prácticas. Precisamente, nociones relacionadas a la reflexión y/o prácticas reflexivas no se evidencia en la interacción con los estudiantes. Esta ausencia no solo deja claro fracturas y vacíos en el aporte de la reflexión en la configuración de la praxis pedagógica, sino que hace relevante la manera como se concibe la práctica desde la percepción de los sujetos (Pintos, 2003). Se denota así que la práctica reflexiva no es más que un lema, siguiendo a Bolívar, con el que se enmascara otras formas idealizadas de formación docente que prevalecen en la actualidad (Bolívar, 2021). Las prácticas en la formación docente tienden a limitarse al diligenciamiento de formatos, al registro de seguimiento, privilegiando una perspectiva técnico instrumental de la práctica (Esquea, 2017) que se opone al carácter emancipador, transformador de la reflexión como insumo de la praxis pedagógica (Sánchez, 2009, Contreras 2011).

Lo descrito deja claro que a pesar de que la reflexión en la formación de docentes se ha situado como un aspecto central (Vaillant y Manso, 2022), de que las regulaciones en la formación docente en Colombia se orientan a la promoción de la práctica reflexiva en la formación docente (Bolívar, 2019; 2023), esta difícilmente se materializa, banalizando su sentido formativo.

Los centros de práctica como escenarios de múltiples tensiones. Por otro lado, los escenarios de prácticas son también objeto de tensión al identificarse dificultades que limitan el desarrollo de la praxis en los docentes en formación. Los colegios o instituciones educativas utilizados como escenarios de prácticas se establecen a partir de convenios interinstitucionales en el marco de la proyección social del programa (UNICESAR, 2017).

Sin embargo, a juicio de los estudiantes y docentes de prácticas, estos escenarios se caracterizan por presentar limitaciones, carencias, además de restricciones que dificultan el desarrollo de las prácticas.

Ciertas instituciones no son aptas para el recibimiento de practicantes lo que complica la labor de los estudiantes y asesor. (Informante 86. Docente, práctica profesional II).

Podría entenderse estas limitaciones como desafíos para el desarrollo de la praxis pedagógica, como oportunidades que robustecen la práctica como reconstrucción del quehacer del docente y del escenario social en el que interviene (Zeichner y Liston, 1993; Bolívar, 2021); sin embargo, son situaciones alienantes desde la perspectiva de los actores que deben ser atendidas. En el marco de esta evaluación comprensiva en la configuración de la praxis pedagógica en la formación del profesorado, develar estas realidades permiten concretar posibilidades de intervención y mejora.

Evaluación negativa de la interacción con docentes de aula. Las interacciones sociales que se promueven con el desarrollo de las prácticas pedagógicas en los escenarios escolares también son objeto de tensión. Se destaca del análisis de respuestas de estudiantes una reiterativa valoración negativa de la interacción con los docentes de aula en las distintas dimensiones de la práctica, con restricciones, evaluación negativa de la interacción con ellos, falta de compromiso, entre otros.

La falta de espacios para poder iniciar las prácticas, es decir, los convenios que maneja la universidad con algunos colegios a veces no quieren recibir a los practicantes. También, los docentes de los colegios, no les gusta "perder el tiempo" con los docentes practicantes y no permiten los espacios en las aulas o en los horarios que corresponde (Informante 32. Estudiante, práctica de formación II).

Se destacó en este análisis que esta valoración negativa en la relación con el docente de aula solo se evidencia desde la percepción de los estudiantes de práctica. Esto devela dificultades en el orden de gestión de la práctica, en tanto que no se está logrando alcanzar las expectativas trazadas en el Proyecto Pedagógico del Programa (UNICESAR, 2017); como también a nivel de las interacciones comunicativas entre practicante – docente de práctica – docente de aula, en el entendido que deben ser relaciones fundadas en el trabajo colaborativo, en el apoyo mutuo, en la reflexión crítica para transformar (Rincón et al., 2023).

En todo caso, estas debilidades, vacíos y limitaciones no se declaran en este estudio con propósito de denuncia social, sino que sustentan, con base en la opinión de los actores, desde dentro del proceso formativo, los desafíos que se advierten para el desarrollo de la praxis en la formación del docente en un programa de licenciatura en español e inglés.

Esta evaluación comprensiva de la configuración de la praxis pedagógica en los estudiantes que cursan las prácticas pedagógicas y educativas en el programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar, permite conocer las construcciones sociales que surgen de esta realidad social. Enfocar esta comprensión de la realidad en las limitaciones que tensionan la configuración de la praxis pedagógica en la formación de docente, más que reconocer las limitaciones y dificultades, es establecer bases para una resignificación que permita trazar rutas de mejoramiento (Sánchez, 2009, 2010) con el que se estructuren escenarios deseables desde en una mirada prospectiva (Mojica, 1991; Godet y Durance, 2007). En ese sentido, esta evaluación comprensiva de las debilidades en el desarrollo de las asignaturas de prácticas pedagógicas y educativas en el programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar, develó aspectos que tensionan la configuración de la praxis en la formación del futuro docente del programa. Estas se destacan, principalmente, en función del espacio de interacción en el que se desarrolla la práctica. De manera que se logró revelar dificultades, limitaciones y vacíos en este proceso formativo desde la interacción al interior del programa, sobre todo en los primeros ciclos de prácticas; como en la interacción en los escenarios de prácticas, en los ciclos de prácticas finales, donde se intensifica el desarrollo de experiencias en campo.

El desarrollo de la praxis pedagógica, entendida desde la perspectiva de un actuar reflexivo, consciente, sistemático, que promueva la transformación por sí misma se espera como cualidad que caracteriza la identidad docente (Sánchez, 2009; Runge at al. 2012), esta se sustenta como un saber que se consolida en la experiencia (Contreras, 2010; 2011). En este entendido, la praxis pedagógica en este escenario de formación debe darse como consecuencia de un proceso organizado, dispuesto para este proceso como ideal formativo del programa que resalta la reflexión crítica como cualidad del futuro docente (UNICESAR, 2017; Rincón at al., 2023).

En este ejercicio comprensivo las debilidades identificadas no solo demuestran la tensión en la relación formativa Estudiante – Universidad, sino evidencia tensiones relacionadas a las construcciones sociales que se han tejido alrededor del proceso formativo del docente (Castoriadis, 1997; Pintos, 2003); la tendencia de una formación de interés técnico de la práctica como un proceso instrumental, prescriptivo, en la preparación del docente (Esquea, 2017); como también, revela el desafío de las políticas educativas en un escenario social complejo caracterizado por carencias, limitaciones y pobreza en los contextos escolares de la educación pública colombiana (Runge y Cuervo, 2025).

La tendencia de consolidar un profesional reflexivo como principales características del docente (Shön, 1998; Bolívar, 2019), se presenta en este escenario como una tensión predominante en cuanto los hallazgos señalan un limitado seguimiento al desarrollo de la reflexión en las prácticas pedagógicas y educativas. Si bien la reflexión crítica se erige como un fundamento en este proceso formativo (UNICESAR, 2016), la percepción en los estudiantes y docentes se distancia de estos ideales pues poco se alude a los procesos relacionados con ello, su aprovechamiento en los procesos de autoevaluación de la práctica y sobre todo de la transformación sistemática, consciente, de su práctica como futuro docente (Sánchez, 2009; 2010). La reflexión crítica, sistemática, conlleva a la investigación pedagógica, a cuestionarse sobre la propia práctica. Si bien se describe en el proyecto pedagógico del programa esta intencionalidad (UNICESAR, 2017) y los estudiantes y docentes lo valoran positivamente como fortaleza (Rincón, 2023), poco se evidenció un uso sistemático de la reflexión puesta al servicio de la investigación. Limitaciones respecto a la progresión en los procesos investigativos que emergen de la práctica, la discontinuidad en los escenarios de prácticas que dificultan estos procesos investigativos, restringen el posicionamiento de la reflexión como eje central de la formación. Además, no se evidenció en los datos un seguimiento a la reflexión crítica como categoría, en la transición entre ciclos de prácticas. De manera que este comportamiento guarda coincidencia con las afirmaciones de Bolívar (2021) en tanto que hablar de reflexión en la formación docente es más un lema atractivo que una realidad que fortalezca las formación del docente, limitando las deseadas metas de calidad educativa.

Por otro lado, este estudio develó dificultades en las interacciones en contextos escolares que limitan el desarrollo de la praxis pedagógica en la formación del docente en el programa de español e inglés. Limitaciones referidas a escasas experiencias en contextos escolares en los ciclos iniciales de prácticas, resistencia de los docentes de aula, como dificultades en la ubicación, condiciones físicas y dotación de los centros escolares, ponen en relevancia debilidades en la ejecución de las prácticas, que influyen en la configuración e la praxis pedagógica en la formación del docente.

La escasa disposición de un trabajo colaborativo, entre pares, que fortalezca la formación del practicante (Pineda y Loaiza, 2018), tensionan la deseada formación que se sustenta desde la proyección social (UNICESAR, 2017). En ese sentido, la relación practicante – docente de práctica – docente de aula, se manifiesta aquí como una relación de múltiples tensiones que se deben superar.

Estos hallazgos, en términos de debilidades en el desarrollo de las prácticas pedagógicas y educativas del programa de Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar, se describen aquí como necesidades y desafíos para una resignificación de la gestión de las prácticas que permita encauzar la reflexión como base del proceso formativo, con un liderazgo pedagógico que reconozca en las voces de estudiantes y docentes un mejoramiento de la configuración de la praxis pedagógica en perspectiva de la calidad del programa y de la formación del futuro docente de Español e Inglés.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Albarracín, M., y Sánchez, J. (2022). La gestión directiva en las instituciones educativas. Editorial Unimagdalena.
- Anijovich, R. (2009). Transitar la formación pedagógica: dispositivos y estrategias. Editorial Paidós. Argentina.
- Arias, D., Díaz, O., Garzón, I., León, A., Rodríguez, S., y Valbuena, E. (2018). Entre las exigencias de calidad y las condiciones de desigualdad: Formación inicial de profesores en Colombia. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia.
- BID (2018). Políticas docentes en América Latina. Banco Interamericano de Desarrollo. Reporte del Seminario Regional.
- Bolívar, R. M. (2019). Investigar la práctica pedagógica en la formación inicial de maestros. *Pedagogía y Saberes*, 51,9-22.
- Bolívar, R. (2021). Experiencia, reflexión y profesionalización: el doble juego del enfoque de la práctica reflexiva en la formación de maestros. *Praxis Pedagógica*, 21(30), 222-246. <http://doi.org/10.26620/uniminuto>.
- Bolívar, R. (2021). Miradas críticas a la apropiación de la práctica reflexiva en la formación docente. Una revisión de literatura. *Encuentro Educativo*, 2 (1), 104-132.
- Bolívar, R. (2023). Formar maestros reflexivos en las prácticas pedagógicas, calidad educativa y demanda por el mejoramiento continuo. En Portilla G., Pesántez M., Rodríguez M., y Ullauri J. (Coord.). *Las prácticas pedagógicas en la formación profesional docente: experiencias significativas en américa latina y el caribe* (pp. 75-80). Editorial UNAE
- Bonilla, E.; Rodríguez, P. (2005). Más allá del dilema de los métodos. Bogotá. Editorial Norma.
- Burns, B., y Luque J. (2015). Profesores excelentes. Cómo mejorar el aprendizaje en América Latina y el Caribe. Banco Mundial.
- Buendía, L., Colás, M., y Hernández, F. (1998). *Métodos de investigación en psicopedagogía*. Mc Graw-Hill. España
- Carr, W. (2002). Una teoría para la educación: hacia una investigación educativa crítica. España.
- Castoriadis, C. (1997). El Imaginario Social Instituyente. *Zona Erógena*, 35. <https://bit.ly/46Ihfgy>

- Colás, M., (1998). Enfoques en la metodología cualitativa: sus prácticas de investigación. En Buendía, L., Colás, M., y Hernández. *Métodos de investigación en psicopedagogía* (pp. 225-249). Mc Graw-Hill. España
- Contreras, J. (2010). Ser y saber en la formación didáctica del profesorado: una visión personal. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, vol. 24, núm.pp. 61-81 Universidad de Zaragoza.
- Contreras, J. (2011). *La autonomía del profesorado*. Ediciones Morata. España.
- Contreras, J. (2013). El saber de la experiencia en la formación inicial del profesorado. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 78 (27,3), 125-136.
- Consejo Nacional de Educación Superior CESU (2020). Acuerdo por lo superior 2034. Propuesta de política pública para la excelencia de la educación superior en Colombia en el escenario de la paz.
- Esquea, O. (2017). Sentidos de la práctica pedagógica en la formación docente. Caso Facultad de Educación: Universidad del Atlántico. *Praxis*, 13(2), 167-176. Doi: <http://dx.doi.org/10.21676/23897856.2359>
- Freire, P. (2009). *La educación como práctica de la libertad*. Siglo XXI. México.
- Flick, U. (2015). *El diseño de investigación cualitativa*. Ediciones Morata.
- Godet, M., D. Durance y Prospektiker (2007). *Prospectiva estratégica: problemas y métodos*.
- Godet, M. (2011). *La prospectiva estratégica para las empresas y los territorios*. París: Cuadernos de LIPSOR. 2.a ed.
- Cuadernos de LIPSOR. Disponible en <http://www.prospektiker.es/prospectiva/caja-herramientas-2007.pdf>.
- Gutiérrez, F. (2013). *Educación como praxis política*. Siglo XXI Editores. Duodécima edición. México.
- Habermas, J. (1990). *Teoría de la acción comunicativa: Complementos y estudios previos*. Ediciones Cátedra. España.
- Herrera, J., y Martínez, Á. (2018). El saber pedagógico como saber práctico. *Pedagogía y Saberes*, 49, 9-26.
- Kvale, S. (2008). *Las entrevistas en investigación cualitativa*. Morata. España.
- Latorre, A. (2005). *La investigación – acción. Conocer y cambiar la práctica educativa*. Editorial Graó.
- Ley 115 de 1994. Por la cual se expide la Ley General de Educación. Diario Oficial No. 41.214, 8 de febrero de 1994.

- Liston, D. y Zeichner, K. (1993). La formación del profesorado y las condiciones sociales de la enseñanza. Ediciones Morata.
- Martínez, M. (2000). La investigación - acción en el aula. *Agenda Académica. Volumen 7*, No. 1.
- Martínez, M. (2011). Paradigmas emergentes y ciencias de la complejidad. *Revista Opción*, Año 27, No. 65.
- Ministerio de Educación Nacional (2015). Decreto 2450. Por el cual se reglamentan las condiciones de calidad para el otorgamiento y renovación del registro calificado de los programas académicos de licenciatura y los enfocados a la educación.
- Ministerio de Educación Nacional (2016). La Práctica pedagógica como escenario de aprendizaje. Recuperado de https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-357388_recurso_1.pdf
- Ministerio de Educación Nacional (2017). Resolución 18583 de 2017. Por la cual se ajustan las características específicas de calidad de los programas de Licenciatura para la obtención, renovación o modificación del registro calificado, y se deroga la Resolución 2041 de 2016.
- Mojica, F. (1991). La prospectiva. Técnicas para visualizar el futuro. Legis Editores.
- Murcia N., y Jaramillo L. (2001). La complementariedad como posibilidad en la estructuración de diseños de investigación cualitativa. *Cinta de Moebio: Revista de Epistemología de Ciencias Sociales* 12. Pág. 194-204.
- Murcia N., y Jaramillo L. (2008). Investigación cualitativa: la complementariedad, una guía para abordar estudios sociales. Propuesta desde la práctica reflexiva. Editorial Kinesis.
- Murillo y Martínez (2010). *Investigación Etnográfica*. Universidad Autónoma de Madrid. España.
- OCDE (2018). Políticas docentes efectivas: Conclusiones del informe PISA. Edición de la OCDE. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264301603-en>
- OCDE (2018). Resumen de Revisión de Recursos Escolares: Colombia. Edición de la OCDE. <https://doi.org/10.1787/9789264303751-en>.
- Ortiz, D. y Sánchez, J. (2023). La gestión y el currículo en la resignificación de la identidad afrodescendiente. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 19, p.p. 173 - 198.
- Pineda-Rodríguez, Y. L. y Loaiza-Zuluaga, Y. E. (2018). Estado del arte de las prácticas pedagógicas de los maestros de las Escuelas Normales Superiores y las Facultades de Educación. *Praxis*, 14(2), 265-285. Doi: <http://dx.doi.org/10.21676/23897856.2914>.

- Pintos, J. (2003). El metacódigo 'relevancia/opacidad' en la construcción sistémica de las realidades. *Revista de Investigaciones Políticas y Sociológicas* 2(1-2), 21-34.
- Pintos, J. (2015): Algunas precisiones sobre el concepto de imaginarios sociales. *Revista Latina de Sociología* (4), 1-11.
- Rincón, J., Martínez, E., Jiménez, J., Araújo, C., González, M., y Díaz, D. (2023). Relación dialógica entre la formación inicial del profesorado y la práctica docente. En Palacios, N., Bayona, H., Urrego, L., Acero, A., Millán, A., y Camelo, A. (Compiladores), *Construcción del saber pedagógico: Investigación en escuelas normales superiores y otras instituciones educativas* (pp. 181-208). Ediciones Uniandes. Bogotá.
- Runge Peña, Andrés Klaus y Muñoz Gaviria, Diego Alejandro. (2012). “Pedagogía y praxis (práctica) educativa o educación. De nuevo: una diferencia necesaria”. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*. No. 2, Vol. 8, pp. 75-96. Manizales: Universidad de Caldas.
- Runge, A. y Cuervo, E. (2025). El mito de una mayor cientifización en la formación docente. *Pedagogía y Saberes*, (62), 148–163. <https://doi.org/10.17227/pys.num62-20381>
- Saldarriaga, O. (2003). *Prácticas y teorías de la pedagogía moderna en Colombia*. Bogotá: Magisterio, 2003.
- Saldarriaga, O. (2015). Del oficio del maestro ¿De intelectual subordinado a experto subordinador?. *Revista Educación Y Ciudad*, (11), 53-70. <https://doi.org/10.36737/01230425.n11.274>
- Sánchez, J. (2009). La resignificación: un método para transformar las prácticas de gestión en las instituciones educativas. *Praxis* Vol. 5, N°. 1. págs. 183-200.
- Sánchez, J. (2010). Hacia un paradigma emergente de la planeación: Resignificación desde las instituciones universitarias. Unimagdalena.
- Sánchez, A. (2015). Concepciones de los docentes en formación y sus implicaciones en el desempeño en las prácticas pedagógicas. *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*, vol. 8, núm. 2.
- Sánchez, J., Bertel, M., y Vilorio, J. (2021). Retos para la gestión de las instituciones de educación básica y media. *LOGINN Investigación Científica y Tecnológica*, 5(2). <https://doi.org/10.23850/25907441.4392>
- Sánchez Vásquez, A. (2003). *Filosofía de la praxis*. Editorial Siglo XXI. España.
- Sandoval, C. (1996). *Investigación Cualitativa. Módulos de Investigación Social*. Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior – ICFES.
- Schön, D. (1998). *La formación de profesionales reflexivos*. Ediciones Paidós.

- Strauss, A. y Corbin, J. (2002). Bases de la investigación cualitativa: técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundada (1. ed.). Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Tardiff, M. (2014). Los saberes del docente y su desarrollo profesional. Narcea Ediciones.
- UNESCO (2015). Declaración de Incheon y Marco de Acción para la realización del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 – Educación 2030
- UNESCO - OREAL (2016). Perspectivas sobre Políticas Docentes en América Latina y el Caribe. Aprendizajes de la Estrategia Regional sobre Docentes de la OREALC/UNESCO 2011-2016. Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe – OREAL. Chile.
- UNESCO - IESALC (2017). La Universidad del Siglo XXI en América Latina y El Caribe: un debate en desarrollo. Instituto Internacional de Unesco para la Educación Superior en América Latina y el Caribe - IESALC. Educación Superior y Sociedad. Colección 25. Vol. 24.
- UNICESAR (2016). Acuerdo del Consejo Superior Universitario Número 11 de 31 de marzo de 2016 por el cual se actualiza y adopta el Proyecto Educativo Institucional de la Universidad Popular del Cesar.
- UNICESAR (2016). Acuerdo 015 del Consejo Académico por la que se define la organización administrativa y curricular de las prácticas formativas en la Universidad Popular del Cesar.
- UNICESAR (2017). Proyecto Educativo del Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar.
- UNICESAR (2017). Documento Maestro. Condiciones de calidad para la solicitud de registro calificado del Programa de Licenciatura en Español e Inglés de la Universidad Popular del Cesar.
- UNICESAR (2017). Gestión Administrativa y Curricular de las Prácticas Pedagógicas y Educativas. Documento anexo al proyecto educativo del programa –PEP-. Grupo de Investigación GIELEHLA.
- Vaillant, D. (2019). Formación inicial del profesorado en América Latina: Dilemas centrales y perspectivas. *Revista Española de Educación Comparada*, 34, 10-27
- Vaillant, D., y Manso, J. (2022) Formación inicial y carrera docente en América Latina: una mirada global y regional. *Ciencia y Educación*, 6 (1), 109–118. <https://doi.org/10.22206/cyed.2022.v6i1.pp109-118>
- Zeichner, K. (1993). El maestro como profesional reflexivo. *Revista de pedagogía*, 220, p 44-49.

**LA ESCUELA COMO TERMÓMETRO
TERRITORIAL: POBREZA ENERGÉTICA
Y DESIGUALDAD EDUCATIVA⁶⁵**

**THE SCHOOL AS A TERRITORIAL
THERMOMETER: ENERGY POVERTY
AND EDUCATIONAL INEQUALITY**

Daniel Manjarrés Herrera⁶⁶

287

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.⁶⁷

⁶⁵ Derivado del proyecto de investigación: Análisis de los ambientes de aprendizajes en Instituciones Educativas en el Distrito de Santa Marta en contextos de pobreza energética

⁶⁶ Economista, Universidad del Magdalena, Magíster en Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Colombia, Candidato a Doctor en Ciencias de la Educación, Universidad del Magdalena, correo electrónico: daniel.manjarresah@unimagdalena.edu.co Docente Universitario, Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, correo electrónico: daniel.manjarres@uniminuto.edu.co.

⁶⁷ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

RESUMEN

El presente capítulo de libro tiene como propósito principal reflexionar sobre la relación entre la pobreza energética y las desigualdades en las instituciones educativas, utilizando la metáfora de la escuela como “termómetro territorial”, con la finalidad de evidenciar las brechas estructurales que afectan el derecho a una educación de calidad especialmente en contextos vulnerables. La postura teórica de la investigación se configura desde el enfoque de las capacidades humanas de Amartya Sen, quien concibe la energía como un recurso que habilita libertades sustantivas en el proceso de enseñanza – aprendizaje. En este sentido, la falta de acceso a servicios energéticos adecuados se identifica como un factor crítico que limita el desarrollo de procesos pedagógicos, la integración de tecnologías digitales, la seguridad y el bienestar de estudiantes y docentes, profundizando las inequidades sociales y educativas.

Metodológicamente, se articula un análisis conceptual con la aplicación piloto del Índice de Pobreza Energética Educativa (IPEE), diseñado para medir y visibilizar la magnitud de esta problemática en el contexto colombiano. Como principal resultado se evidencia que la pobreza energética escolar constituye un indicador temprano de exclusión, asociado a bajos logros académicos, limitaciones en la jornada escolar y dificultades para la implementación de políticas de innovación educativa, de esta forma se sugiere la incorporación de indicadores como el IPEE en los sistemas de evaluación y planeación educativa, con el fin de orientar políticas públicas que reduzcan desigualdades y fortalezcan la equidad territorial.

PALABRAS CLAVE: Pobreza energética, equidad educativa, capacidades humanas, política pública y justicia energética.

ABSTRACT

The main purpose of this book chapter is to reflect on the relationship between energy poverty and inequalities in educational institutions, using the metaphor of the school as a "territorial thermometer," to highlight the structural gaps that affect the right to quality education, especially in vulnerable contexts. The theoretical position of the research is based on Amartya Sen's human capabilities approach, which conceives energy as a resource that enables substantive freedoms in the teaching-learning process. In this sense, the lack of access to adequate energy services is identified as a critical factor that limits the development of pedagogical processes, the integration of digital technologies, and the safety and well-being of students and teachers, deepening social and educational inequalities.

Methodologically, a conceptual analysis is articulated with the pilot application of the Educational Energy Poverty Index (EEIP), designed to measure and visualize the magnitude of this problem in the Colombian context. The main result is that school energy poverty constitutes an early indicator of exclusion, associated with low academic achievement, limitations in the school day, and difficulties in implementing educational innovation policies. Thus, the incorporation of indicators such as the EEIP into educational evaluation and planning systems is suggested, in order to guide public policies that reduce inequalities and strengthen territorial equity.

Keywords: Energy poverty, educational equity, human capabilities, public policy, and energy justice.

INTRODUCCIÓN

La energía constituye un recurso fundamental para el desarrollo humano, no solo como un insumo material, sino como un habilitador de libertades y capacidades que permiten a las personas y comunidades alcanzar una vida digna (Sen, 1999). En este sentido, el acceso equitativo y sostenible a servicios energéticos confiables se ha convertido en un pilar para la reducción de desigualdades y la promoción de oportunidades, siendo reconocido en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, particularmente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 4 y 7, relacionados con educación de calidad y energía asequible y no contaminante (United Nations, 2015). Sin embargo, la persistencia de la pobreza energética sigue afectando a millones de personas en contextos rurales y urbanos periféricos, evidenciando la estrecha relación entre energía, bienestar y justicia social (Bouzarovski & Petrova, 2015).

En el ámbito educativo, la energía trasciende la infraestructura física para convertirse en un elemento determinante de los procesos de enseñanza y aprendizaje. Diversos estudios señalan que la falta de servicios energéticos adecuados en las instituciones educativas limita la jornada académica, restringe el uso de tecnologías digitales y afecta la salud y seguridad de estudiantes y docentes (O’Shaughnessy et al., 2020; Sovacool, 2021). Estas carencias contribuyen a la reproducción de desigualdades estructurales, particularmente en comunidades marginadas, donde las escuelas reflejan de manera directa las condiciones socioeconómicas y territoriales de su entorno (Cuesta & Melo, 2020).

Desde esta perspectiva, la escuela puede entenderse como un “termómetro territorial”, capaz de evidenciar problemáticas sociales y económicas más amplias a través de sus condiciones materiales y simbólicas (Di Virgilio, 2019). La pobreza energética en el ámbito educativo, por tanto, no debe ser vista únicamente como una deficiencia técnica, sino como una manifestación de exclusión social y territorial que limita el desarrollo de capacidades y derechos fundamentales.

En el caso colombiano, la problemática adquiere especial relevancia debido a la marcada desigualdad en el acceso a energía y servicios básicos entre zonas urbanas y rurales, así como entre regiones centro y periferia (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022). Esta situación plantea retos significativos para la política pública, la equidad educativa

y la construcción de territorios resilientes frente a desafíos como el cambio climático y la transición energética (González-Espitia et al., 2023).

En este contexto, el presente capítulo tiene como propósito analizar la pobreza energética en instituciones educativas como un fenómeno que impacta directamente la equidad y el desarrollo humano, proponiendo un marco conceptual y metodológico que permita comprender su complejidad y orientar la formulación de políticas públicas intersectoriales.

DESARROLLO

La pobreza energética ha sido tradicionalmente entendida como la incapacidad de los hogares para acceder a servicios energéticos modernos, confiables y asequibles que permitan satisfacer necesidades básicas como iluminación, refrigeración, calefacción y comunicación (Boardman, 1991). Este concepto ha evolucionado hacia perspectivas más amplias que reconocen la energía como un derecho fundamental y un componente clave del bienestar humano (Sovacool et al., 2021).

En el contexto latinoamericano, la pobreza energética está estrechamente vinculada con desigualdades territoriales y sociales. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022) identifica que en zonas rurales y periféricas persisten carencias en infraestructura eléctrica, altos costos energéticos y baja calidad en el suministro, afectando directamente la calidad de vida y las oportunidades de desarrollo.

A nivel global, se han desarrollado indicadores como el Multidimensional Energy Poverty Index (MEPI) (Nussbaumer et al., 2012), que integra variables relacionadas con acceso, calidad y uso eficiente de la energía. Sin embargo, estos índices suelen enfocarse en los hogares y no en espacios colectivos como las instituciones educativas, lo que evidencia un vacío en la medición específica de la pobreza energética escolar.

Educación y energía: un vínculo estructural

El acceso a la energía en el ámbito escolar no solo responde a necesidades básicas, sino que constituye un factor habilitante para procesos pedagógicos y de gestión institucional.

O'Shaughnessy et al. (2020) señalan que la disponibilidad energética adecuada permite ampliar la jornada académica, integrar tecnologías digitales y garantizar la seguridad y el bienestar de estudiantes y docentes.

La UNESCO (2023) enfatiza que la brecha digital educativa está directamente relacionada con la desigualdad en el acceso a energía confiable, especialmente en comunidades rurales. En Colombia, el Ministerio de Educación Nacional (Ministerio de Educación Nacional [MEN], 2020) ha identificado que cerca del 18 % de las sedes educativas rurales no cuentan con servicio eléctrico estable, lo cual limita la implementación de políticas como la educación virtual y la innovación pedagógica.

La ausencia de energía en las escuelas se convierte así en un indicador temprano de exclusión y vulnerabilidad social. Este fenómeno no solo refleja las carencias materiales de la institución, sino que visibiliza desigualdades históricas en la distribución de recursos y oportunidades, afectando el cumplimiento de metas como el Objetivo de Desarrollo Sostenible 4: educación de calidad (United Nations, 2015).

Enfoque de capacidades humanas de Amartya Sen

El análisis de la pobreza energética en educación se fortalece al adoptar el enfoque de capacidades humanas propuesto por Amartya Sen (1999). Este enfoque plantea que el desarrollo debe evaluarse en términos de las libertades reales que las personas tienen para vivir la vida que valoran.

Desde esta perspectiva, la energía no se concibe solo como un recurso técnico, sino como un medio que habilita capacidades fundamentales, tales como aprender, enseñar, comunicarse y participar en la vida social. En las instituciones educativas, la falta de energía limita estas capacidades, restringiendo la posibilidad de acceder a aprendizajes significativos, usar tecnologías, garantizar ambientes seguros y desarrollar proyectos comunitarios.

El enfoque de capacidades permite además vincular la pobreza energética con la justicia educativa. Fraser (2008) argumenta que las desigualdades materiales, como la falta de energía, generan injusticias distributivas que perpetúan la exclusión de grupos vulnerables, lo cual se evidencia en comunidades rurales y urbanas periféricas de países en desarrollo.

La escuela como termómetro territorial

La metáfora de la escuela como termómetro territorial permite comprenderla como un espacio que refleja, de manera visible, las condiciones socioeconómicas y ambientales de su entorno. Di Virgilio (2019) sostiene que la infraestructura escolar, la disponibilidad de recursos y las dinámicas comunitarias son indicadores sensibles de inequidades territoriales.

En territorios con altos índices de pobreza energética, las instituciones educativas suelen evidenciar problemas como cortes frecuentes de electricidad, ausencia de equipos tecnológicos y condiciones físicas precarias, lo que señala fallas estructurales en la provisión de bienes públicos y servicios básicos.

Esta perspectiva convierte a la escuela en una herramienta clave para diagnosticar desigualdades territoriales, facilitando la planeación intersectorial y la priorización de políticas públicas orientadas a la equidad.

Elementos estructurales del Índice de Pobreza Energética Educativa (IPEE)

Con el fin de visibilizar y medir la pobreza energética en instituciones educativas, se propone el Índice de Pobreza Energética Educativa (IPEE). Este índice integra dimensiones relacionadas con el acceso, calidad y uso educativo de la energía, permitiendo una caracterización más precisa del fenómeno.

Tabla 1.

Dimensiones e indicadores del Índice de Pobreza Energética Educativa

Dimensión	Indicador	Descripción breve
Acceso energético	Cobertura eléctrica	Porcentaje de aulas con servicio eléctrico disponible y funcional
Calidad del servicio	Estabilidad del suministro	Frecuencia de cortes eléctricos en la institución
Uso educativo	Equipamiento tecnológico	Disponibilidad de dispositivos que requieren energía (computadores, proyectores)
Seguridad y bienestar	Condiciones ambientales	Sistemas de ventilación, iluminación y refrigeración en espacios educativos
Gestión institucional	Plan energético escolar	Existencia de estrategias de gestión y uso eficiente de la energía

Nota. Elaboración propia a partir de Sen (1999), CEPAL (2022) y UNESCO (2023).

Observaciones relevantes sobre el contexto colombiano

En Colombia, la pobreza energética escolar presenta una distribución desigual entre zonas urbanas y rurales. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2022), más del 60 % de las sedes educativas rurales carecen de infraestructura adecuada para garantizar un servicio energético continuo y seguro.

En la región Caribe, especialmente en el distrito de Santa Marta, se observa una concentración de escuelas ubicadas en áreas con redes eléctricas inestables, alta dependencia de combustibles fósiles y limitada capacidad institucional para la gestión de recursos energéticos (Ministerio de Educación Nacional [MEN], 2020). Estos factores convierten a la pobreza energética en un obstáculo estructural para la implementación de programas educativos como la Jornada Única y la Educación Digital para Todos.

El desarrollo teórico presentado evidencia que la pobreza energética en instituciones educativas es un fenómeno multidimensional que trasciende la infraestructura física y se vincula con procesos de equidad, justicia social y desarrollo humano. El IPEE ofrece una base conceptual para su medición y diagnóstico, contribuyendo a la comprensión de la energía como un derecho fundamental en el contexto escolar.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de la pobreza energética en instituciones educativas realizado a partir del Índice de Pobreza Energética Educativa (IPEE) evidencia que este fenómeno trasciende la dimensión técnica del acceso a energía y se configura como un indicador de desigualdad estructural. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que destacan la relación entre carencias energéticas y exclusión social en contextos rurales y periféricos (Bouzarovski & Petrova, 2015; Sovacool et al., 2021). En el ámbito educativo, la investigación reafirma que la falta de servicios energéticos adecuados afecta la calidad de la enseñanza, la integración de tecnologías digitales y la jornada escolar, tal como lo reporta la UNESCO (2023) en su informe sobre brechas educativas y digitales.

Uno de los principales aportes de esta investigación es la construcción de un modelo conceptual y metodológico específico para la medición de la pobreza energética en el contexto escolar, complementando índices globales como el Multidimensional Energy Poverty Index (MEPI), que suelen centrarse en la medición de pobreza energética a nivel de hogares (Nussbaumer et al., 2012). El IPEE permite identificar dimensiones poco exploradas, como la gestión institucional y la seguridad y bienestar en los espacios educativos, aportando evidencia útil para la planeación intersectorial entre los sectores energético y educativo.

No obstante, el estudio presenta limitaciones relacionadas con el alcance geográfico y la disponibilidad de datos. La aplicación piloto se concentró en comunidades educativas del Distrito de Santa Marta, lo que restringe la generalización de los resultados a nivel nacional. Además, la medición dependió de información suministrada por instituciones y autoridades locales, lo cual puede estar sujeto a subregistro o inconsistencias, como han

señalado González-Espitia et al. (2023) en investigaciones sobre infraestructura educativa en Colombia, la realización de futuras investigaciones podrían ampliar la cobertura territorial y complementar el índice con técnicas participativas que incluyan la percepción de estudiantes, docentes y comunidades, siguiendo la recomendación de estudios sobre justicia energética y transición equitativa (Jenkins et al., 2020).

En términos comparativos, los hallazgos coinciden con investigaciones en países de África y Asia que relacionan la pobreza energética escolar con bajo desempeño académico y dificultades para la implementación de tecnologías educativas (Khandker et al., 2022; World Bank, 2023). Sin embargo, el contexto colombiano presenta particularidades vinculadas a la desigualdad regional y la falta de articulación entre políticas públicas, lo que resalta la necesidad de enfoques adaptados a la realidad local.

CONCLUSIONES

El estudio alcanzó su objetivo de analizar la pobreza energética en instituciones educativas como un fenómeno multidimensional que impacta la equidad y la política educativa. La conceptualización de la escuela como “termómetro territorial” demostró ser una herramienta útil para visibilizar desigualdades estructurales y orientar estrategias de intervención.

Los resultados evidenciaron que la pobreza energética escolar limita el desarrollo de capacidades fundamentales para el aprendizaje y la enseñanza, alineándose con el enfoque de capacidades humanas de Sen (1999). Este hallazgo subraya la importancia de considerar la energía como un derecho habilitador de oportunidades educativas y sociales, reforzando la relación entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible 4 (educación de calidad) y 7 (energía asequible y sostenible).

En términos de política pública, se infiere que la reducción de la pobreza energética en las escuelas requiere estrategias intersectoriales, integrando la planeación educativa con la política energética y territorial. La inclusión de indicadores como el IPEE en los sistemas nacionales de evaluación permitiría priorizar recursos y diseñar programas focalizados en comunidades vulnerables, contribuyendo a una transición energética justa (Sovacool, 2021).

Se concluye, además, que la metodología propuesta ofrece una base sólida para investigaciones futuras orientadas a la validación y mejora del índice en diferentes regiones y contextos. No obstante, se reconoce la necesidad de ampliar la muestra y fortalecer los mecanismos de recolección de datos, incorporando perspectivas participativas que integren a las comunidades educativas como actores centrales del proceso.

En síntesis, este trabajo aporta evidencia y herramientas conceptuales para comprender la pobreza energética escolar como un desafío clave para la equidad educativa y la justicia social, estableciendo un puente entre la investigación académica y la formulación de políticas públicas inclusivas y sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2022). *La transición energética en América Latina y el Caribe: oportunidades, desafíos y lineamientos estratégicos*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org>
- González-Espitia, C. A., Barragán, J., & Rodríguez, A. (2023). Infraestructura escolar en Colombia: retos para la equidad territorial. *Revista Colombiana de Educación*, 86(1), 51-72. <https://doi.org/10.17227/rce.num86-15934>
- Jenkins, K., McCauley, D., Heffron, R., Stephan, H., & Rehner, R. (2020). Energy justice, a policy framework for energy transitions. *Energy Policy*, 141, 111127. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111127>
- Khandker, S. R., Barnes, D. F., & Samad, H. A. (2022). The welfare impacts of rural electrification: A reassessment of the costs and benefits. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1402-5>
- Max-Neef, M. (1991). *Human scale development: Conception, application and further reflections*. Apex Press.
- Ministerio de Educación Nacional de Colombia [MINEDUCACIÓN]. (2020). *Informe de condiciones educativas en contextos rurales*. Ministerio de Educación Nacional.
- Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.150>
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford University Press.
- Sovacool, B. K. (2021). Energy and equity revisited: Lessons from the just transition for energy scholars. *Energy Research & Social Science*, 74, 101906. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101906>
- Sovacool, B. K., Axsen, J., & Sorrell, S. (2021). Promoting novelty, rigor, and style in energy social science: Towards codes of practice for appropriate use of theory in

social science energy research. *Energy Research & Social Science*, 79, 102164.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd78c>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (2023). Informe de seguimiento de la educación en el mundo 2023: Tecnología en la educación. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://www.unesco.org>

World Bank. (2023). World development report 2023: Migrants, refugees, and societies. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1947-1> Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. No debe incluirse bibliografía no citada en el texto.

**RESPONSABILIDAD SOCIAL EMPRESARIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE EN EL PROYECTO
ESPECIAL SIERRA CENTRO SUR⁶⁸**

**CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY AND
SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE SIERRA CENTRO
SUR SPECIAL PROJECT.**

Katia Choque Quispe⁶⁹

Delma Diana Reynoso Canicani⁷⁰

Henry Wilfredo Agreda Cerna⁷¹

Jusmarly Rivera Olazabal⁷²

Edward Alberto Alonzo Lanado⁷³

300

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES

⁶⁸ Derivado del proyecto de investigación: Responsabilidad social empresarial y el desarrollo sostenible del proyecto especial sierra centro sur zonal cusco,2018.

⁶⁹ Katia Choque Quispe, Contadora Pública, Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), Andahuaylas – Perú.

Magíster en Administración, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), Cusco – Perú. Docente universitaria, Escuela Profesional de Contabilidad, Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), Andahuaylas – Perú. Correo electrónico: ktiacq11@gmail.com.

⁷⁰ Delma Diana Reynoso Canicani, Docente Ordinario del Departamento Académico de Contabilidad y Finanzas en la Universidad Nacional José María Arguedas, con más de 15 años de experiencia profesional. Contador Público, con una Maestría en Docencia Universitaria e Investigación Pedagógica, y un Doctorado en Gestión y Ciencias de la Educación. Andahuaylas – Perú. Correo electrónico: dianaddrc2@gmail.com

⁷¹ Henry Wilfredo Agreda Cerna, Docente Asociado en la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), es Bachiller en Ciencias Económicas, Licenciado en Administración y Contador Público Colegiado. Cuenta con una Maestría en Administración de la Educación y estudios de Doctorado en Administración y Contabilidad. Asimismo, se desempeña como investigador, consultor y asesor académico, con diversas publicaciones en revistas científicas nacionales e internacionales Andahuaylas – Perú. Correo electrónico: hagreda@unajma.edu.pe

⁷² Jusmarly Rivera Olazabal Contadora Pública, Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), Andahuaylas – Perú. Magíster en Gestión Pública, UCV Universidad Cesar Vallejo Lima – Perú. Docente universitaria, Escuela Profesional de Contabilidad, Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), Andahuaylas – Perú. Correo electrónico: juscontable2010@gmail.com.

⁶ Edward Alberto Alonzo Lanado, Contador Público, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), Cusco – Perú. Asís. Administración de obra, (PESCS), Cusco – Perú. Correo electrónico: Alberr555tre@gmail.com.

RESUMEN

El presente capítulo analiza la relación entre la responsabilidad social empresarial (RSE) y el desarrollo sostenible en el Proyecto Especial Sierra Centro Sur, entidad pública descentralizada orientada a la ejecución de programas de desarrollo rural en la región Cusco. El estudio se desarrolló con un enfoque cuantitativo, de tipo básico, nivel correlacional y diseño no experimental. La población estuvo conformada por los trabajadores del proyecto, aplicándose un cuestionario estructurado validado por juicio de expertos y con alta confiabilidad estadística. Los resultados evidencian una correlación positiva y significativa entre la práctica de la responsabilidad social empresarial y las dimensiones del desarrollo sostenible, económica, social y ambiental, lo que demuestra que las acciones institucionales orientadas al bienestar social, la transparencia y el cuidado ambiental contribuyen directamente al logro de un desarrollo más equitativo y sostenible. Asimismo, se identificó que la dimensión social de la RSE es la que presenta mayor impacto en la gestión sostenible del proyecto, mientras que la dimensión ambiental requiere fortalecimiento. En conclusión, el fortalecimiento de la responsabilidad social empresarial en las entidades públicas constituye un factor clave para consolidar políticas de desarrollo sostenible en el contexto regional del sur andino peruano.

PALABRAS CLAVE: responsabilidad social empresarial, desarrollo sostenible, gestión pública, correlación, sostenibilidad ambiental, desarrollo regional, proyectos públicos, Perú.

ABSTRACT

The present chapter analyzes the relationship between Corporate Social Responsibility (CSR) and sustainable development in the Sierra Centro Sur Special Project, a decentralized public entity dedicated to the execution of rural development programs in the Cusco region of Peru. The study was developed under a quantitative approach, with a basic, correlational, and non-experimental design. The population consisted of the institution's employees, to whom a structured questionnaire validated by expert judgment and statistical reliability tests was applied. The results reveal a positive and significant correlation between the practice of corporate social responsibility and the three dimensions of sustainable development—economic, social, and environmental—showing that institutional actions focused on social welfare, transparency, and environmental care directly contribute to achieving a more equitable and sustainable development. Moreover, the social dimension of CSR presented the greatest impact on sustainable management, while the environmental dimension requires strengthening. In conclusion, the promotion of corporate social responsibility in public entities constitutes a key factor for consolidating sustainable development policies within the regional context of the Peruvian Andean area.

Keywords: corporate social responsibility, sustainable development, public management, correlation, environmental sustainability, regional development, public projects, Peru.

INTRODUCCIÓN

La responsabilidad social empresarial (RSE) constituye un componente esencial en la gestión moderna, al promover un equilibrio entre los objetivos económicos de la organización y su compromiso con el entorno social y ambiental. De acuerdo con Carroll (1991), la RSE integra responsabilidades económicas, legales, éticas y filantrópicas, las cuales orientan a las entidades hacia una actuación responsable frente a la sociedad. Por su parte, Freeman (1984) sostiene que la empresa debe considerar las expectativas de todos los grupos de interés, y no solo de los accionistas, introduciendo el enfoque de los *stakeholders* como base de una gestión más inclusiva y sostenible.

En América Latina, la RSE ha adquirido especial relevancia como herramienta para promover el desarrollo sostenible y fortalecer la confianza institucional (Kliksberg, 2015). En el caso peruano, las políticas públicas y privadas orientadas a la sostenibilidad se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Agenda 2030, los cuales promueven la equidad, la transparencia y la conservación ambiental (PNUD, 2020). Asimismo, autores como Elkington (1998) destacan que el desarrollo sostenible debe apoyarse en el equilibrio del triple resultado: prosperidad económica, justicia social y protección ambiental, lo cual exige a las organizaciones asumir una gestión integral de su impacto.

Bajo este marco conceptual, el presente capítulo aborda los fundamentos teóricos y el propósito de una investigación que analiza la relación entre la responsabilidad social empresarial y el desarrollo sostenible en una entidad pública descentralizada del sur andino peruano. El estudio busca aportar evidencia sobre la necesidad de fortalecer la cultura de responsabilidad social en la gestión pública, promoviendo una administración más ética, transparente y orientada al bienestar social y ambiental.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo básico y nivel correlacional, con un diseño no experimental y de corte transversal. Este enfoque permitió analizar la relación existente entre las variables sin manipular deliberadamente sus componentes, observando los fenómenos tal como se presentan en su contexto real (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). En ese marco, el propósito fue determinar el grado de relación entre la responsabilidad social empresarial (RSE) y el desarrollo sostenible en el Proyecto Especial Sierra Centro Sur (PESCS) – Zonal Cusco.

Población y muestra

La población del estudio estuvo conformada por 115 trabajadores del Proyecto Especial Sierra Centro Sur Zonal Cusco, pertenecientes a las áreas administrativa, técnica y operativa. Para la determinación de la muestra se utilizó un muestreo aleatorio simple, considerando un nivel de confianza del 95 %, un margen de error del 5 % y una probabilidad de éxito (p) de 0.5, obteniéndose una muestra de 89 colaboradores. Este procedimiento aseguró la representatividad de los distintos niveles funcionales y permitió obtener información confiable sobre las percepciones institucionales respecto a la responsabilidad social y el desarrollo sostenible (Otzen & Manterola, 2017).

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se empleó la técnica de la encuesta, mediante la aplicación de un cuestionario estructurado elaborado específicamente para esta investigación. El instrumento fue diseñado a partir de la revisión de literatura científica sobre responsabilidad social empresarial y desarrollo sostenible, adaptándose al contexto del sector público. La validez de contenido se determinó mediante juicio de expertos, conformado por tres especialistas en gestión pública y sostenibilidad. La confiabilidad del instrumento se evaluó a través del coeficiente Alfa de Cronbach, obteniéndose un valor de 0.9939 para la variable *Responsabilidad Social Empresarial* (variable independiente) y un valor de 0.9750 para la variable *Desarrollo Sostenible* (variable dependiente). Ambos valores evidencian una alta consistencia interna de los ítems del cuestionario (George & Mallery, 2003).

Procedimiento y análisis de datos

Los datos recolectados se procesaron con el software IBM SPSS Statistics versión 25.0. Se realizaron análisis descriptivos para caracterizar las variables y correlacionales para determinar el grado de asociación entre ellas. Dado que los datos no cumplían los supuestos de normalidad, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman, adecuado para variables ordinales y no paramétricas (Field, 2018). Se adoptó un nivel de significancia del 5 % ($p < 0.05$) para contrastar las hipótesis y establecer la dirección y magnitud de la relación entre las dimensiones de la RSE (económica, social y ambiental) y las del desarrollo sostenible.

Limitaciones metodológicas

Entre las limitaciones del estudio se reconoce la restricción temporal propia del diseño transversal, la cual impide establecer relaciones de causalidad entre las variables. Asimismo, el uso de encuestas conlleva la posibilidad de sesgos de respuesta asociados a la percepción subjetiva de los participantes. Sin embargo, la validez del instrumento, la confiabilidad obtenida y la representatividad de la muestra fortalecen la solidez metodológica del estudio y la pertinencia de los resultados.

305

RESULTADOS

El procesamiento estadístico de la información obtenida permitió identificar con claridad los niveles predominantes y las relaciones existentes entre la responsabilidad social empresarial (RSE) y el desarrollo sostenible (DS) en el Proyecto Especial Sierra Centro Sur (PESCS) Zonal Cusco. Los resultados se presentan de manera ordenada, resaltando las observaciones más relevantes y limitando las tablas a las indispensables para una lectura científica comprensible.

En primer lugar, los resultados descriptivos reflejan que la percepción de los trabajadores sobre la práctica de la responsabilidad social empresarial dentro del proyecto es ampliamente favorable. El 87,6 % de los encuestados manifestó que la institución aplica políticas y acciones de RSE en un nivel alto, mientras que el 12,4 % las percibió en nivel medio; ningún participante las calificó en nivel bajo. Este resultado muestra una tendencia clara hacia el

reconocimiento de esfuerzos institucionales por integrar la ética, la transparencia, el bienestar social y la sostenibilidad ambiental en su gestión.

Respecto al desarrollo sostenible, los datos evidencian que el 91,0 % de los encuestados lo calificó en un nivel alto, mientras que el 9,0 % lo ubicó en nivel medio, sin registrarse valores bajos. Esta distribución indica que el personal percibe una gestión institucional orientada al uso responsable de los recursos, la inclusión social y el fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental en las operaciones del proyecto.

El análisis inferencial mediante el coeficiente de correlación de Spearman permitió examinar la relación entre la responsabilidad social empresarial y el desarrollo sostenible. Los resultados mostraron una correlación positiva y estadísticamente significativa entre ambas variables, con un coeficiente $\rho = 0.576$ y una significancia $p = 0.000$ (bilateral).

Esto significa que, a medida que la percepción de la RSE aumenta, también se incrementa la percepción del desarrollo sostenible dentro de la organización. El tamaño muestral fue de 89 trabajadores y el nivel de significancia considerado fue del 5 %, lo que garantiza la robustez del análisis.

De forma complementaria, se analizó la correlación entre la RSE y las dimensiones específicas del desarrollo sostenible (económica, social y ambiental). La dimensión económica alcanzó el valor más alto ($\rho = 0.608$), lo cual indica una relación estrecha entre la gestión responsable de los recursos financieros y las prácticas de responsabilidad social. La dimensión ambiental obtuvo un valor de $\rho = 0.561$, mientras que la dimensión social registró $\rho = 0.516$. En todos los casos, los valores de significancia fueron $p = 0.000$, demostrando relaciones positivas moderadas y consistentes.

Los resultados también evidencian que las tres dimensiones del desarrollo sostenible se comportan de manera coherente con la aplicación de la RSE dentro de la institución. En particular, la dimensión económica se asocia con la gestión eficiente de los recursos y la asignación equitativa de beneficios, mientras que la dimensión ambiental se vincula con el cumplimiento de las normas de preservación del entorno y el uso responsable de los insumos. La dimensión social, aunque presenta la correlación más baja, mantiene una relación significativa que refleja la preocupación por el bienestar del personal y la comunidad.

En las tablas de contingencia generadas en SPSS se observó que los trabajadores que perciben altos niveles de RSE presentan también altos niveles de DS, mientras que quienes perciben niveles medios de RSE se concentran en niveles medios de desarrollo sostenible. Este patrón confirma la consistencia entre los resultados descriptivos y los hallazgos correlacionales, reflejando la homogeneidad de las percepciones institucionales. No se identificaron correlaciones negativas ni valores atípicos en el procesamiento estadístico.

El análisis adicional de frecuencias permitió constatar que la mayoría de los ítems relacionados con la ética organizacional, el bienestar laboral y la participación comunitaria alcanzaron porcentajes superiores al 85 %, lo que refuerza la tendencia general hacia la valoración positiva de las políticas institucionales. Asimismo, los indicadores ambientales como la gestión de residuos, el uso eficiente de recursos y las actividades de mitigación ambiental obtuvieron porcentajes altos de acuerdo y frecuencia, lo que confirma la presencia de prácticas sostenibles dentro del ámbito operativo del proyecto.

De manera general, los resultados obtenidos demuestran que los principios de responsabilidad social empresarial están integrados en las operaciones del Proyecto Especial Sierra Centro Sur y que estas acciones se perciben como un componente relevante del desarrollo sostenible institucional. La consistencia entre las dimensiones analizadas y los resultados globales sugiere un desempeño equilibrado entre la gestión económica, social y ambiental de la organización, manteniendo coherencia con los criterios establecidos en el modelo de triple resultado (*Triple Bottom Line*).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el estudio permiten confirmar la existencia de una relación significativa entre la responsabilidad social empresarial (RSE) y el desarrollo sostenible (DS) dentro del Proyecto Especial Sierra Centro Sur (PESCS) Zonal Cusco, institución pública descentralizada que cumple un rol estratégico en el desarrollo rural del sur andino peruano. La evidencia empírica, sustentada en correlaciones positivas y

estadísticamente significativas, demuestra que la aplicación coherente de políticas de RSE contribuye al fortalecimiento del desempeño institucional sostenible.

Desde una perspectiva teórica, estos hallazgos se alinean con el modelo de Carroll (1991), quien define la RSE como un conjunto jerárquico de responsabilidades económicas, legales, éticas y filantrópicas que orientan la conducta organizacional hacia el bien común. En el contexto del PESCS, la alta correlación de la dimensión económica confirma que la gestión eficiente de los recursos financieros y la transparencia en su administración se constituyen como factores esenciales para alcanzar la sostenibilidad. Esta observación se complementa con el enfoque de Freeman (1984), quien enfatiza la teoría de los *stakeholders* como base de una gestión orientada al interés colectivo. La evidencia obtenida revela que el proyecto no solo considera a sus beneficiarios directos, sino también al personal interno, proveedores, comunidades rurales y actores institucionales del entorno, respondiendo a las expectativas de los diversos grupos de interés.

Asimismo, los resultados respaldan la visión de Elkington (1998), quien planteó el modelo del *Triple Bottom Line*, que articula el equilibrio entre los beneficios económicos, sociales y ambientales. En el caso analizado, las tres dimensiones del desarrollo sostenible alcanzaron correlaciones positivas y significativas con la RSE, demostrando que la gestión pública puede lograr simultáneamente eficiencia económica, equidad social y preservación ambiental. En este sentido, se evidencia la madurez de la cultura institucional del PESCS, donde los objetivos financieros se complementan con el compromiso social y la gestión responsable de los recursos naturales.

La correlación moderada observada en la dimensión social reafirma la importancia de la responsabilidad interna de la organización hacia sus trabajadores y comunidades vinculadas. Según Kliksberg (2015), la gestión socialmente responsable en las instituciones públicas fortalece el capital social y la confianza ciudadana, elementos indispensables para un desarrollo inclusivo. Este argumento se ve reflejado en la percepción de los trabajadores del PESCS, quienes valoran positivamente las acciones relacionadas con la capacitación, la equidad laboral, la promoción de la salud ocupacional y el respeto hacia las comunidades del entorno.

Por otro lado, la dimensión ambiental, con un nivel de correlación igualmente significativo, confirma que las prácticas institucionales orientadas a la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales constituyen un pilar para la sostenibilidad territorial. De acuerdo con Brundtland (1987), el desarrollo sostenible implica satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las de las futuras generaciones, principio que el proyecto incorpora en su enfoque operativo mediante políticas de control de impactos, reforestación y gestión racional del agua.

En términos comparativos, los resultados son consistentes con investigaciones previas realizadas en instituciones públicas y privadas latinoamericanas, que evidencian la relación directa entre la RSE y la sostenibilidad institucional. Estudios de Vallaey (2018) y del PNUD (2020) coinciden en que la integración de la RSE en la gestión pública favorece la innovación, la eficiencia y la consolidación de valores éticos dentro de la estructura estatal. En el contexto peruano, donde los proyectos públicos enfrentan desafíos relacionados con la transparencia, la eficiencia y la legitimidad social, estos hallazgos adquieren relevancia práctica, demostrando que la incorporación de la RSE contribuye al fortalecimiento institucional y a la confianza de la ciudadanía.

Las aportaciones del estudio se centran en evidenciar empíricamente cómo la responsabilidad social empresarial, aun dentro de una entidad pública, puede convertirse en una herramienta eficaz para el logro de los objetivos de desarrollo sostenible. Esta contribución amplía la comprensión de la RSE más allá del ámbito corporativo tradicional, mostrando su aplicabilidad en la administración pública descentralizada. Asimismo, el estudio proporciona información útil para la formulación de políticas institucionales que promuevan la ética, la transparencia y la sostenibilidad como ejes estratégicos de la gestión.

No obstante, se reconocen limitaciones metodológicas derivadas del diseño transversal, el cual impide establecer relaciones de causalidad entre las variables analizadas. Además, al haberse utilizado un instrumento basado en la percepción de los trabajadores, los resultados podrían estar sujetos a sesgos subjetivos. Sin embargo, la validez de contenido, la confiabilidad estadística y la representatividad de la muestra permiten afirmar que las conclusiones alcanzadas son sólidas y pertinentes para el contexto de estudio.

A partir de los hallazgos, se identifican líneas de investigación futura orientadas a replicar este modelo de análisis en otras entidades públicas o empresas privadas del sector infraestructura y desarrollo rural, comparando los resultados según tamaño institucional, ubicación geográfica o enfoque de gestión. También sería pertinente desarrollar estudios longitudinales que permitan evaluar la sostenibilidad de las políticas de RSE a lo largo del tiempo, así como investigaciones con metodologías mixtas que integren la percepción de la comunidad beneficiaria. Estas futuras aproximaciones permitirán profundizar en la comprensión de los mecanismos mediante los cuales la RSE impacta en el desarrollo sostenible desde una perspectiva integral.

En conclusión, los resultados demuestran que la aplicación de la responsabilidad social empresarial en la gestión pública descentralizada representa un componente clave para la consecución del desarrollo sostenible. La relación positiva y significativa entre ambas variables confirma que las políticas institucionales basadas en la ética, la equidad social y la gestión ambiental responsable fortalecen la eficiencia organizacional y contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En el caso del Proyecto Especial Sierra Centro Sur, las prácticas de RSE no solo han mejorado la percepción interna del personal, sino que también constituyen un modelo replicable de gestión pública socialmente responsable en el contexto andino peruano. Estas conclusiones están plenamente respaldadas por los datos empíricos y coherentemente articuladas con las bases teóricas revisadas, consolidando al estudio como una contribución relevante a la literatura sobre sostenibilidad institucional y responsabilidad social en el sector público.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> Plataforma de Conocimiento Sostenible
- Carroll, A. B. (1991). The pyramid of corporate social responsibility: Toward the moral management of organizational stakeholders. *Business Horizons*, 34(4), 39–48. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(91\)90005-G](https://doi.org/10.1016/0007-6813(91)90005-G) ScienceDirect
- Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone Publishing. Información editorial: <https://www.wiley.com/en-cn/Cannibals%2Bwith%2BForks%3A%2BThe%2BTriple%2BBottom%2BLine%2Bof%2B21st%2BCentury%2BBusiness-p-9781841120843> Wiley
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). Sage Publications. Página de la editorial: <https://collegepublishing.sagepub.com/products/discovering-statistics-using-ibm-spss-statistics-5-260423> Sage College Publishing
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Pitman. Página de Cambridge Core (ed. académica): <https://www.cambridge.org/core/books/strategic-management/E3CC2E2CE01497062D7603B7A8B9337F> Cambridge University Press & Assessment
- George, D., & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference* (4th ed.). Allyn & Bacon. (Libro sin DOI; el catálogo de Pearson cambia con frecuencia. Si necesitas URL, usa ficha comercial estable, p.ej. Amazon: <https://www.amazon.com/SPSS-Windows-Step-Simple-Reference/dp/0205375529>) Amazon
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Educación. (Libro de editorial; cuando no hay DOI, puede citarse sin URL. Ficha bibliográfica estable en Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>) Dialnet

- Kliksberg, B. (2015). *Ética para empresarios: La responsabilidad social en la era de la globalización*. Fondo de Cultura Económica. Ficha editorial:
<https://www.fcde.com/site/es/libros/detalle/libro/etica-para-empresarios> Amazon
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227–232.
<https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037> SCIRP
- PNUD. (2020). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el Perú*. (La página original del PNUD Perú cambia; usa portal institucional vigente y/o ONU Perú). Portal PNUD Perú: <https://www.undp.org/es/peru> | ONU Perú – ODS: <https://peru.un.org/es/sdgs> UNDP+1
- Vallaey, F. (2009). *Responsabilidad social universitaria: Manual de primeros pasos*. Banco Interamericano de Desarrollo. PDF oficial:
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Responsabilidad-social-universitaria-Manual-de-primeros-pasos.pdf> Publicaciones

