



U24

fest



“ideas para
proteger la
vida”

*Memorias
Científicas *



Descripción* * del evento

Cumpliendo con los propósitos misionales de la UIS, las Facultades de Ingenierías y Ciencias Humanas realizaron, en la semana del 28 de octubre al 1 de noviembre de 2024, el evento científico, académico y cultural de carácter internacional, *U24 FEST - Ideas para proteger la vida*, el cual buscaba fomentar la investigación, la innovación y la gestión del conocimiento, e impactar a la sociedad con la generación de espacios en los que concurran la comunidad académica, científica nacional e internacional, sector gubernamental y comunidad en general, para exponer y recoger las ideas y expectativas de la universidad y de la región en torno a las temáticas definidas en el evento.

Con la integración de las Facultades de Ingenierías Físicoquímicas, Ingenierías Fisicomecánicas y Ciencias Humanas, se buscó que el evento contara con una visión integral alrededor de “La protección de la vida” en todas sus dimensiones, lo cual permite una toma de conciencia colectiva y la realización de acciones concretas con miras a preservar el bienestar y mejoramiento de la existencia de todos los seres que pueblan nuestra casa común.

Dentro del componente científico se presentaron artículos que abordaron investigaciones en tres diferentes temáticas, que buscaban inspirar futuras generaciones y fortalecer la cultura científica en nuestro entorno. Estos documentos fueron revisados y evaluados por expertos en cada una de las áreas de interés y, posteriormente, fueron presentados como ponencia en el evento.

Ejes temáticos del evento



**Investigación
e innovación
desde el
enfoque ético**



**Transición
energética
justa**



**Ciencias sociales,
desarrollo
humano y cultural
con equidad**



* Ejes * temáticos

Innovación e investigación con enfoque ético

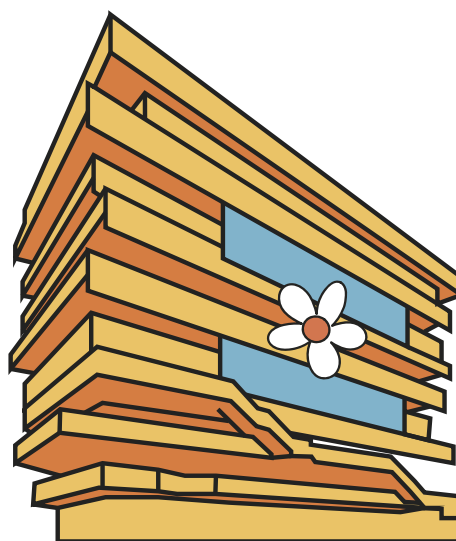
Queremos promover una investigación y una innovación que sean responsables, pertinentes, transparentes y participativas. Imaginemos una vida donde la ciencia y la tecnología se desarrollen con la plena consciencia de su impacto social y ambiental. Un lugar donde la ética, la igualdad de género, la educación científica y el acceso abierto al conocimiento sean pilares fundamentales. No se trata solo de avanzar, sino de avanzar juntos y de manera responsable.

Ciencias sociales, desarrollo humano y cultural con equidad

Visualizamos una sociedad donde la educación de calidad y el desarrollo humano sean accesibles para todos. Inspirados por la Misión de Sabios, queremos fomentar una educación que no solo transmita conocimientos técnicos, sino que también desarrolle habilidades esenciales y vocaciones científicas. Creemos en el fortalecimiento de la democracia en la universidad, en el reconocimiento y participación de todos los miembros de la comunidad, en un entorno universitario donde cada voz sea escuchada, valorada y las diferencias sean respetadas y tenidas en cuenta.

Transición energética justa

Nuestro planeta enfrenta grandes desafíos, y uno de los más urgentes es la necesidad de una transición energética justa y sostenible. Soñamos con una sociedad en la que Colombia y el mundo apuesten por energías limpias, que reduzcan la dependencia de combustibles fósiles y enfrenten el cambio climático de manera decidida. Creemos en la soberanía energética y en un acceso democrático a la energía para todos, buscando siempre el equilibrio entre el progreso y la preservación de nuestro entorno.



* Comité Científico *

Ana Cecilia Ojeda Avellaneda

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Johann Farith Petit Suárez

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Sandra Judith García Vergara

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Erik Giovanni Montes Páez

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Gabriel Ordóñez Plata

Universidad Industrial de Santander, Colombia

María Virginia Portillo

Universidad de Nottingham, Reino Unido

Marcelo Villar

Universidad Nacional del Sur, Argentina

María de los Ángeles Arenas

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas,
España

Ana Conde del Campo

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas,
España

* Comité organizador *

Johann Farith Petit Suárez

Decano Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Ana Cecilia Ojeda Avellaneda

Decana Facultad de Ciencias Humanas

Sandra Judith García Vergara

Decana Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

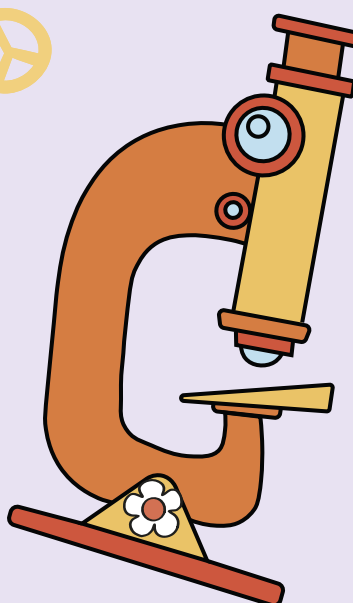


Tabla de Contenido

	Pag.		Pag.
Ejes temáticos del evento	2	Detección de anomalías relacionadas con el cáncer de mama utilizando modelos de aprendizaje profundo e imágenes térmicas	65
Investigación e innovación con enfoque ético	7		
Análisis del costo computacional de la criptografía en microcontroladores	8	Sistemas dinámicos en infraestructura vial: modelado de las ecuaciones de deterioro en afirmados del Banco Mundial	75
La tecnoética y bioética: reflexiones filosóficas acerca de la IA	18	Catálogo ilustrado de geomorfología en el Cañón del Chicamocha, región del departamento de Santander	85
BWMP2: dataset RGB para clasificación de materiales con un modelo fundacional finamente ajustado	21	Frecuencia de diez infecciones de transmisión sexual en población con condición de vulnerabilidad del área metropolitana de Bucaramanga y Cúcuta	96
Evaluación postincendio de la vegetación del páramo de Santurbán mediante imágenes espectrales	31	Transición energética justa	107
Determinantes empresariales del gasto en investigación y desarrollo en las empresas de Colombia	40	Desarrollo de un motor Stirling mejorado para generación de energía en zonas remotas y desérticas: solución para comunidades vulnerables en La Guajira, Colombia	108
Implementación de modelo de redes neuronales convolucionales para clasificación de imágenes hiperespectrales usando transformada Wavelet	46	Diseño conceptual de una planta piloto para la demostración de la generación eléctrica a partir de la pirólisis de residuos plásticos	116
Exploración de los fundamentos de la reconstrucción 3D con structure from motion: implementación y pruebas con monumentos de la UIS	55	Potencial geotérmico de Colombia: estrategias y tecnologías para su explotación	126

Biofuels in Colombia: challenges and opportunities 127

El rol del hidrógeno en la transición energética colombiana 134

Marine Fuels: Difficulties and Advantages, Colombian Vision 141

Smart grids: el núcleo de la digitalización en la transición energética 150

Colombia, a key player in the Latin American energy transition 160

Consumo energético en aplicaciones web intensivas: un caso de estudio con *raytracing* 164

Methodology for the Implementation of a Communications System Using Light Beams with Orbital Angular Momentum 173

Evaluación de la integridad de un material polimérico como revestimiento interno durante la inyección de CO₂ en proyectos CCS (Carbon Capture & Storage) 180

Ciencias sociales, desarrollo humano y cultural con equidad 187

Lesiones de rodilla en lucha estilo libre. Una revisión sistemática 188

Análisis estadístico de los intentos de suicidio y factores asociados en los jóvenes de Santander, 2016-2023 195

Transformar el mundo es posible... ¡a la manera de los niños! 205

Innovación en nutrición de precisión para un futuro cercano 208

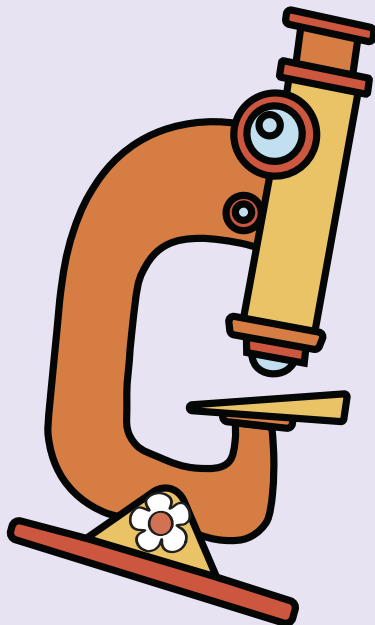
El entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución y su efecto en el salto vertical y sprint en atletas universitarios: una revisión sistemática 218



U24
fest



Investigación e
innovación desde
el enfoque ético *



Análisis del costo computacional de la criptografía en microcontroladores

Cristian Manuel Sierra Jerez

Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
cristian2192308@correo.uis.edu.co

Abad Plata Vera

Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
abad2191814@correo.uis.edu.co

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
jbarrero@e3t.uis.edu.co

Resumen

La criptografía es la ciencia que transforma información utilizando claves matemáticas; esencial para proteger datos. En el contexto de dispositivos IoT, los microcontroladores, que monitorean variables y procesos, varían en costo según su arquitectura. Esta investigación propone una metodología para evaluar la viabilidad de implementar criptografía en microcontroladores de bajo costo, enfocándose en el consumo de memoria y tiempo de cómputo de algoritmos criptográficos estandarizados. El objetivo principal es analizar la eficiencia y costo computacional de estos algoritmos en microcontroladores.

La evaluación se basa en una ingeniería conceptual y básica, que revisa sistemas criptográficos robustos y arquitecturas de microcontroladores. La implementación de los algoritmos se evalúa midiendo el consumo de memoria y tiempo de cómputo, a través de herramientas del entorno de programación. Se concluye que la criptografía en microcontroladores de bajo costo es una solución eficaz para proteger información en sistemas IoT, dado que fortalece la confiabilidad en las tecnologías emergentes de la era 4.0.

Palabras clave: algoritmos criptográficos, costo computacional, microcontroladores.

1. Introducción

El mundo actual ha experimentado una transformación radical en la forma en que aprendemos, trabajamos y vivimos, convirtiendo a la tecnología en una herramienta indispensable. Los avances tecnológicos en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT) han abierto un nuevo horizonte en una era donde la tecnología se integra cada vez más en el día a día de las personas. Sin embargo, el desarrollo de aplicaciones IoT implica diversos desafíos tecnológicos y de seguridad, como lo demuestra un estudio reciente de Rueda-Rueda (2021). Entre los más relevantes se encuentran la comunicación inalámbrica, el consumo de energía, las limitaciones en *hardware*, la escalabilidad, la identificación de nodos sensores, la sincronización en la transmisión y el intercambio de claves. Estos desafíos pueden afectar el rendimiento, la confiabilidad de los recursos, la seguridad de los datos y la gestión de identidad, aspectos que deben considerarse cuidadosamente en el proceso de diseño e implementación. Estas necesidades de seguridad se intensifican en áreas específicas como el IIoT (internet industrial de las cosas), IoMT (internet de las cosas médicas) y el IoT aplicado a servicios para el hogar. En estas áreas, las tecnologías IoT están directamente relacionadas con el bienestar de las personas, pues manejan datos tanto de procesos industriales como de salud, los cuales forman parte de la información personal y privada de cada individuo o empresa. Un estudio presentado por Olivarez *et al.* (2023) revela un aumento del 400 % en ataques dirigidos a dispositivos IoT entre 2018 y 2020, con una tendencia al alza en los años siguientes. Esta creciente amenaza exige la implementación de medidas de seguridad robustas y la adopción de protocolos estandarizados para proteger la integridad y confidencialidad de los datos en estas áreas críticas.

Diversos estudios se han enfocado en crear algoritmos de criptografía ligera para proteger la información en sistemas IoT limitados. Se han propuesto alternativas a la gestión o distribución de claves, como las presentadas por Gouvêa (2012) y Wang *et al.* (2007), donde se implementa criptografía de clave pública en microcontroladores con multiplicadores en *hardware*. También se han analizado los requerimientos de diferentes algoritmos criptográficos ultraligeros en aplicaciones específicas, como en la agricultura (Chaturvedi, 2022). Sin embargo, investigaciones como la de Rana *et al.* (2022) revelan vulnerabilidades en estos algoritmos ultraligeros ante ataques de fuerza bruta, lo que hace necesario seguir indagando sobre la viabilidad de algoritmos criptográficos ya estandarizados. Por lo tanto, la viabilidad de los algoritmos criptográficos estandarizados en microcontroladores de bajo costo varía según sus características en *hardware*, la complejidad propia de cada algoritmo, los requisitos de procesamiento de los algoritmos, la velocidad de procesamiento propia de cada microcontrolador y el nivel de seguridad que pueden proporcionar.

La contribución de este trabajo se basa en la implementación de una metodología de evaluación mediante la cual se analiza el rendimiento de los algoritmos criptográficos estandarizados, basados en el consumo de memoria y tiempo de cómputo. En consecuencia, el presente trabajo se organiza de manera que, en la sección 2, se describe la metodología desarrollada; en la sección 3, se presentan los algoritmos utilizados y los resultados obtenidos; en la sección 4, se tiene su respectivo análisis. Finalmente, la sección 5 concluye este trabajo y plantea posibles trabajos futuros.

2. Metodología

La metodología desarrollada en este trabajo se basa en la selección cuidadosa de microcontroladores y algoritmos criptográficos, la configuración del entorno de desarrollo apropiado, la implementación de los algoritmos criptográficos y las pruebas de desempeño. Esta metodología sigue los lineamientos necesarios para dar cumplimiento al objetivo general de la investigación, y se desarrolla de la siguiente manera:

2.1 Selección de algoritmos criptográficos y microcontroladores de bajo costo

Como punto de partida, se identificaron cuatro microcontroladores de bajo costo con diferentes arquitecturas de *hardware* y cuatro algoritmos criptográficos estandarizados. La selección de algoritmos se basó en una revisión bibliográfica detallada y en la relevancia de los algoritmos, según su aplicación en entornos tecnológicos reales; fueron seleccionados los algoritmos AES (Advanced Encryption Standard), ChaCha20, SHA-256 (Secure hash Algorithm) y ECC (Elliptic Curve Cryptography), los cuales ofrecen altos niveles de seguridad, eficiencia en diversos dispositivos, y han sido rigurosamente evaluados y aprobados por organismos internacionales para proteger datos sensibles en múltiples aplicaciones.

Por su parte, la selección de microcontroladores se basó en la revisión de las hojas de datos de cada microcontrolador, donde se consideraron los siguientes criterios:

- Costo comercial no mayor a \$50.000 pesos colombianos.
- Conectividad Wi-Fi o módulos compatibles.

De los cuales resultaron seleccionados los siguientes microcontroladores:

- **ESP32:** basado en el chipset ESP32-WROOM-32 de 32 bits, con microprocesador Xtensa LX6 de doble núcleo, de los cuales se empleó uno (Cadence, 2022).
- **Raspberry-Pi-Pico:** basado en el chipset RP2040 de 32 bits, con microprocesador Arm Cortex M0+ doble núcleo, de los cuales se empleó uno (Raspberry Pi, 2024).
- **Arduino Uno R3:** basado en el microcontrolador ATmega328p de Microchip de 8 bits, con velocidad de reloj de 16 MHz (Microchip, 2024).
- **STM32F401CCU6:** basado en el chipset STM32 de STMicroelectronics, con procesador Arm Cortex M4 de 32 bits de un solo núcleo (STMicroelectronics, 2019). Cuyas características en *hardware* se pueden apreciar con más claridad en la tabla I.

Tabla 1
Especificaciones de los microcontroladores

Modelo (Microcontrolador)	Frecuencia (MHz)	Memoria Flash (KB)	Memoria SRAM (KB)	Flash (KB) disponible	SRAM (KB) disponible
ESP32 (ESP – WROOM32)	240	4096	520	1280	320
Raspberry Pi Pico (RP2040)	133	2048	264	2044	256
STM32F401CCU6 (STM32)	84	256	64	256	64
Arduino Uno R3 (ATmega328p)	16	32	2	31.5	2

2.2 Elección del lenguaje de programación y el entorno de desarrollo

Se eligió el lenguaje de programación C, pues, según Ionesco (2020), permite una mejor asignación de memoria y un aprovechamiento eficiente de los recursos en los microcontroladores a nivel de *hardware*, en comparación con desarrollos en Python. El entorno de desarrollo seleccionado fue la IDE de Arduino, además de su lenguaje de programación natural en C; cuenta con soporte para una gran variedad de placas de desarrollo donde se realizará el análisis de los algoritmos seleccionados. Este entorno de desarrollo se adecuó con bibliotecas como AESLib (Sychra, 2006), Crypto (Weatherley, 2023) y tinyECC (Annigeri, 2021), las cuales fueron útiles para el desarrollo y ejecución de los códigos propios de cada algoritmo.

2.3 Implementación de los algoritmos criptográficos y criterios de evaluación

La implementación de los algoritmos se realizó a partir de códigos que representan la transmisión de una contraseña de 16 caracteres sin formato (texto plano), la cual se propuso según las reco-

mendaciones de claves seguras, como longitud entre 12 y 16 caracteres, incluidos números. Finalmente, se evaluaron el consumo de memoria, tiempo de cómputo y nivel de seguridad aportado a cada sistema embebido. Los resultados se compararon con el consumo básico de cada microcontrolador con sus periféricos, según las hojas de datos.

3. Resultados

En esta sección se presentan de forma breve los algoritmos criptográficos AES, ChaCha20, SHA-256 y ECC, junto con los resultados obtenidos.

3.1 Advanced Encryption Standard (AES)

Aprobado por el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología), en el año 2000, es el estándar de cifrado por bloques ideal para entornos productivos. Es ampliamente utilizado para manejar información confidencial con variantes como AES-128, AES-192 y AES-256, según el tamaño de la clave en bits. AES garantiza propiedades de seguridad como confusión, difusión y no linealidad, lo cual refuerza su robustez (Dwor-

kin, 2023). Además, ofrece modos de operación como ECB (Electronic Code Block), CBC (Cipher Block Chaining), CFB (Cipher Feedback), OFB (Output Feedback) y CTR (Counter). En este trabajo, se usa el modo CBC, considerado óptimo por su seguridad, resistencia a errores, sincronización, *padding* y ejecución en paralelo. Los resultados se pueden ver en la tabla 2.

3.2 ChaCha20

ChaCha20, un cifrado por flujo, es eficaz para información en tránsito; se usa actualmente en protocolos como TLS (Transport Layer Security) y OpenSSH (Open Secure Shell). Mejorado a partir de Salsa20, ChaCha20 soluciona problemas de seguridad relacionados con la difusión. Utiliza claves de 256 bits (valor recomendado) o 128 bits y 2 valores aleatorios de 8 bytes que refuerzan el proceso de cifrado y por tanto su seguridad. El cifrado se realiza con matrices mediante operaciones ARX (Addition, Rotation, XOR) (Yadav *et al.*, 2016). Los resultados se pueden ver en la tabla 3.

3.3 Función hash SHA2-256 y HMAC- SHA2-256

Las funciones hash resultan efectivas para garantizar la integridad de la información, no requieren claves y son difíciles de invertir o romper. Detectan modificaciones, dado que cualquier cambio en la información altera el hash computado. Además, existen variantes añadidas a las funciones hash, estas son las funciones MAC (Message Authentication Code), las cuales funcionan a partir de una clave simétrica usada como firma única proporcionada al hash y que da paso a las llamadas funciones HMAC (Hash based MAC). SHA-2 de 256 bits y la función HMAC- SHA2-256 se seleccionaron en este trabajo por su equilibrio

entre seguridad y costo computacional, dado que la generación de un hash de 512 bits requiere casi el doble de procesamiento que uno de 256 bits (Sklavos y Koufopavlou, 2003). Los resultados se pueden ver en la tabla 4.

3.4 Elliptic curve cryptography (ECC)

ECC utiliza curvas elípticas definidas como $y^2 = x^3 + ax + b \mod(p)$, donde el módulo p es el rango finito que se trabaja, y a y b son números reales, que cumplen $4a^3 + 27b^2 \neq 0$

Ofrece seguridad comparable a RSA (Rivest, Shamir y Adleman) con claves más cortas, y mejora velocidad, almacenamiento y ancho de banda. Usado en protocolos como TLS, blockchain y tarjetas inteligentes (Kapoor, 2008). En este trabajo, se implementa la curva

$$y^2 = x^3 + x + 23 \mod(991)$$

definida en la biblioteca tinyECC. Los resultados se pueden ver en la tabla 5.

4. Discusión

Las tablas 2, 3, 4 y 5 proporcionan una comparación detallada del rendimiento de los algoritmos criptográficos implementados en los diferentes microcontroladores analizados.

Los resultados muestran que el microcontrolador Arduino Uno no es el más eficiente para criptografía por su bajo rendimiento comparado con los otros microcontroladores, dado que su desventaja es notoria en los tiempos de cómputo. Su arquitectura de 8 bits y baja velocidad de procesamiento, en comparación con los demás microcontroladores, lo hacen inadecuado para cifrar información de manera eficiente.

Al comparar los resultados de los microcontroladores con arquitecturas de 32 bits, se observa que

el algoritmo AES es quien más memoria consume, independiente del microcontrolador analizado.

Tabla 2

Resultados para el algoritmo AES

	Algoritmo AES	Generación clave [us]	Cifrado byte [us]	Descifrado byte [us]	Flash cifrado [%]	RAM cifrado [%]	Flash descifrado [%]	RAM descifrado [%]
ESP32	128	10.75	3.68	1.9	21.31	2.4267	21.2841	2.3854
	192	16.06	4.24	2.24	21.31	2.4291	21.2841	2.3864
	256	21.38	5	2.63	21.31	2.4316	21.2854	2.3913
Raspberry pi pico	128	17.22	9.12	4.96	7.1633	3.4927	7.1422	3.4851
	192	25.6	10.5	5.85	7.1633	3.4957	7.1422	3.4912
	256	33.99	12.38	6.86	7.1633	3.4988	7.1422	3.4912
STM32	128	13.79	8.55	4.7	66.81	11.053	66.0079	11.0412
	192	20.55	9.85	5.55	66.81	11.066	66.011	11.0534
	256	27.3	11.84	6.57	66.81	11.078	66.014	11.0656
Arduino	128	1444.44	83.71	37.19	13.132	25.537	14.6329	25.83
	192	2166.66	96.4	43.49	13.132	25.928	14.6577	26.2207
	256	2888.45	114.66	51.23	13.132	26.318	14.8003	26.6113

Tabla 3

Resultados para el algoritmo ChaCha20

	Algoritmo ChaCha20	Generación clave [us]	Cifrado byte [us]	Descifrado byte [us]	Flash cifrado [%]	RAM cifrado [%]	Flash descifrado [%]	RAM descifrado [%]
ESP32	Clave 128	10.76	0.77	0.78	3.0929	0.2697	3.0337	0.2343
	Clave 256	21.38	0.76	0.77	3.0929	0.2746	3.0349	0.2392
Raspberr y pi pico	Clave 128	17.3	1.97	1.91	0.1165	1.1886	0.07262	1.1856
	Clave 256	34.07	1.94	1.85	0.1165	1.1947	0.07262	1.1917
STM32	Clave 128	13.79	1.74	1.76	3.7231	0.7507	0.7995	0.5371
	Clave 256	27.3	1.72	1.74	3.7231	0.7751	0.8056	0.5371
Arduino	Clave 128	1446.59	201.16	201.15	19.7792	27.7343	17.2495	27.246
	Clave 256	2892.29	201.11	201.1	19.7792	28.5156	17.2991	28.0273

Tabla 4

Resultados para los algoritmos SHA-256 y HMAC-SHA256

	Algoritmo	Generación clave [us]	Cifrado byte [us]	Flash cifrado [%]	RAM cifrado [%]
ESP32	SHA-256	NO	1.61	3.0807	0.2221
	HMAC-SHA256	PRE-DEF	6.44	3.0841	0.227
Raspberry pi pico	SHA-256	NO	4.25	0.1024	1.1703
	HMAC-SHA256	PRE-DEF	17	0.1039	1.1764
STM32	SHA-256	NO	4.02	0.8316	0.4699
	HMAC-SHA256	PRE-DEF	15.94	0.8468	0.4943
Arduino	SHA-256	NO	632.51	20.7589	23.9746
	HMAC-SHA256	PRE-DEF	2525.32	20.9263	24.7558

Tabla 5

Resultados para el algoritmo ECC

	Algoritmo	Generación clave [us]	Cifrado byte [us]	Descifrado byte [us]	Flash cifrado [%]	RAM cifrado [%]	Flash descifrado [%]	RAM descifrado [%]
ESP32	ECC	400.12	493.79	29.132	2.7716	0.2111	2.68898	0.2111
Raspberr y pi pico	ECC	2137.37	2338.04	154.51	0.2086	1.1047	0.1762	1.1047
STM32	ECC	1413.34	1540.47	103.7	3.9382	0.4333	3.5339	0.4333
Arduino	ECC	269312.71	286271.9 3	19540.69	22.5322	13.6718	22.5322	13.3789

El consumo de memoria es más alto al combinar el algoritmo AES con la placa STM32, pues para los demás algoritmos y microcontroladores, el porcentaje de memoria consumida, tanto RAM como Flash, se mantiene por debajo del 5 %, lo cual demuestra la viabilidad de la criptografía en soluciones IoT que utilizan sistemas de desarrollo de 32 bits o superiores con capacidades de memoria similares.

Como se evidencia en la figura 1, el tiempo correspondiente a la generación de la clave aumenta según la longitud de clave deseada, de manera similar, sin importar el algoritmo de cifrado implementado en microcontroladores de 32 bits. Esto indica que la generación de la clave aleatoria

está directamente relacionada con la capacidad de procesamiento de cada microcontrolador, lo que explica los tiempos de cómputo proporcionales por los microcontroladores presentados en la figura 1, según la longitud de clave que requieren los algoritmos. Al comparar la capacidad de procesamiento del Arduino frente los demás, se tiene una relación uno a cuatro en manejo de bytes, lo que explica sus resultados.

Los tiempos relacionados con el proceso de cifrado y descifrado de los algoritmos AES, ChaCha20, SHA-256 y HMAC-SHA-256 se presentan en la figura 3, mientras que los tiempos del algoritmo ECC son presentados en la figura 2.

Figura 1

Tiempo para la generación de la clave[byte/us]

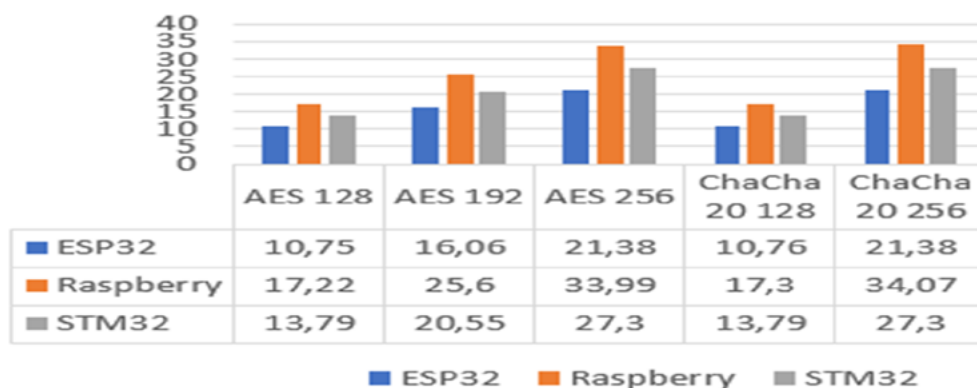
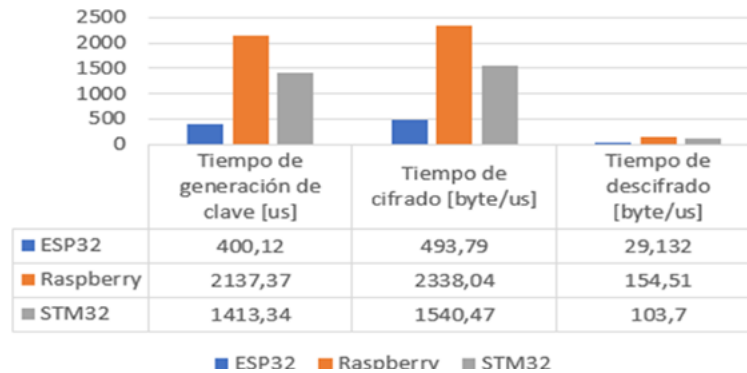


Figura 2

Resultados algoritmo ECC cifrado/descifrado [us]

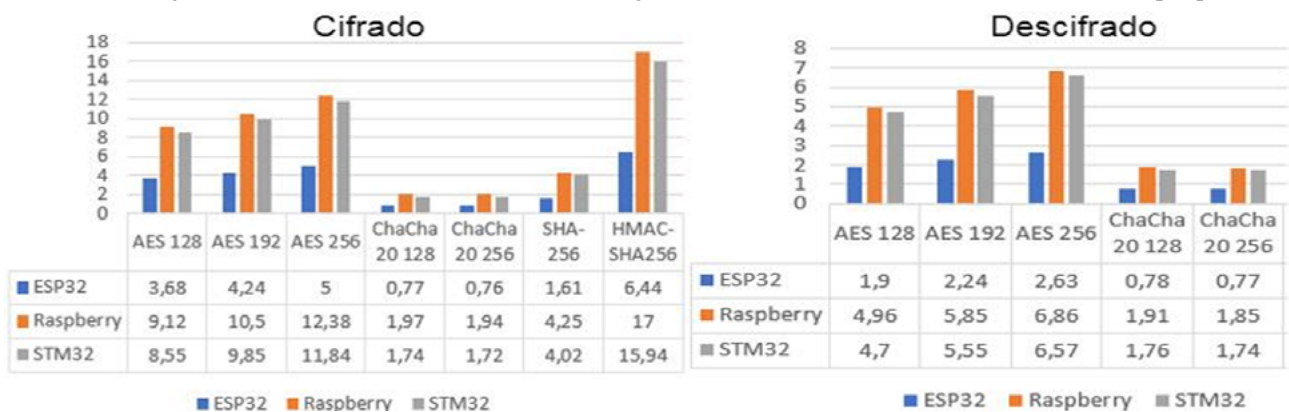


Por un lado, los resultados muestran que el algoritmo AES incrementa el tiempo de cómputo para cifrado y descifrado en todos los microcontroladores a medida que aumenta el tamaño de la clave, mientras que en el cifrado ChaCha20 no sucede lo mismo (figura 3). Estos resultados reflejan un mejor rendimiento del cifrado ChaCha20 en los microcontroladores analizados, debido a su eficiencia en tiempos de cómputo y memoria, independiente de la longitud de la clave. Por otro lado, se evidencia que la implementación de funciones HMAC representa un costo elevado en tiempos de cómputo en comparación con la función hash SHA-256, algo que no se refleja en el consumo de memoria (tabla 4).

Los resultados inquietantes en el tiempo de cómputo fueron por parte del cifrado ECC, propio de la biblioteca tinyECC, que evidencia la complejidad del algoritmo criptográfico y su fundamentación matemática, la cual representa un costo elevado en el procesamiento de cada microcontrolador. Este algoritmo descarta aún más al Arduino Uno como un microcontrolador óptimo para tareas de cifrado de información, y refuerza el buen rendimiento que tiene la ESP32 para todos los casos. No se descarta que los resultados se deban específicamente a la implementación del cifrado por parte de la biblioteca tinyECC o la curva elíptica planteada, pues existen diversas curvas elípticas que podrían presentar mejores resultados.

Figura 3

Resultados para AES, ChaCha20, SHA-256 y HMAC-SHA256 cifrado/descifrado [us]



5. Conclusiones

El ESP32 generalmente muestra un rendimiento eficiente tanto en tiempos de cifrado/descifrado como en uso de memoria, especialmente para AES y ChaCha20, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde la eficiencia de recursos es crucial.

El Raspberry Pi Pico ofrece un rendimiento equilibrado con bajo uso de memoria. Sin embargo, presenta tiempos más altos, especialmente para ECC, lo cual indica que el tiempo de cómputo se relaciona directamente con la generación propia del microprocesador.

El STM32 muestra un alto uso de memoria, especialmente de memoria Flash, lo que podría ser una consideración para aplicaciones con desarrollos en código complejos. En general, tiene un rendimiento intermedio en todos los resultados, adecuado para AES y ChaCha20.

El Arduino Uno tiene un rendimiento inferior frente a los microcontroladores de 32 bits, es hasta 10.000 veces más lento en tiempos de cómputo y usa el 25 % de su memoria, frente al 3 % de los demás microcontroladores. Estas limitaciones, sumadas a su costo, hacen más recomendable elegir microcontroladores con mejor desempeño y eficiencia.

Entre los microcontroladores de 32 bits resalta el ESP32, el cual es más adecuado para tareas que requieren procesamiento intensivo y rápido, como la generación de claves aleatorias y operaciones complejas, en comparación con microcontroladores de 32 bits a menor velocidad de procesamiento y, de manera más evidente, con microcontroladores de 8 bits con baja velocidad de procesamiento y limitaciones en memoria como el Arduino Uno.

En general, ChaCha20 muestra tiempos muy eficientes en todos los dispositivos, hecho que sugiere que es una excelente opción para criptografía en *hardware* limitado. AES también es muy eficiente, especialmente en el ESP32, mientras que ECC tiene un rendimiento significativamente más lento en todos los microcontroladores, lo que puede limitar su uso en aplicaciones IoT. Por esta razón, se plantea como trabajo futuro el rediseño de las bibliotecas criptográficas aplicando RTOS (sistema operativo en tiempo real), con el objetivo de mejorar el desempeño de los microcontroladores con cada algoritmo criptográfico, y plantear una mayor viabilidad de la criptografía en estos sistemas limitados.

Referencias

- Annigeri, S. (2021). Repositorio GitHub: tinyECC-ArduinoIDE. DOI: <https://github.com/ShubhamAnnigeri/tinyECC-ArduinoIDE>
- Cadence. (2016). Xtensa LX6 Customizable DPU. DOI: mirrobo.ru/wp-content/uploads/2016/11/Cadence_Tensilica_Xtensa_LX6_ds.pdf
- Chaturvedi, S. P, Mukherjee, R y Yadav, A. (2022). Comparison between Ultra Lightweight Cryptographic Techniques on Microcontrollers for Smart Agriculture.
- Dionicio, P. O. G., Gil, A. J. L., De Los Santos, A. C. M. (2023). Principales técnicas criptográficas aplicadas a la seguridad de la información en IoT: una revisión sistemática. Ingenio Tecnológico, Vol. 5.
- Dworkin, M. (2023, mayo). Federal Inf (NIST FIPS): Advanced Encryption Standard (AES).

DOI: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=936594

Gouvêa, C. P. L., Oliveira, L. B. y López, J. (2012). Efficient software implementation of public-key cryptography on sensor networks using the MSP430X microcontroller. *Rev. Springer*, vol. 2, *J Cryptogr Eng* 2, pp 19–29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13389-012-0029-z>

Ionescu, V. M. y Enescu, F. M. (2020). Investigating the performance of MicroPython and C on ESP32 and STM32 microcontrollers. *Proceedings of SIITME*, Pitesti, Romania, pp. 234-237. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIITME50350.2020.9292199>

Kapoor, V., Abraham, V. S., y Singh, R. (2008). Elliptic curve cryptography. *Ubiquity*, Vol. 2008, No. May, pp. 1-8. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1386853.1378356>

Microchip. (2024). ATmega328P. DOI: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>

Rana, M., Mamun, Q., Islam, R. (2022). Lightweight cryptography in IoT networks: A survey, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 129, pp 77-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.11.011>

Raspberry Pi Ltd. (2024). Raspberry Pi Pico Datasheet An RP2040-based microcontroller board. DOI: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>

Rueda-Rueda, J. S. (2021). El reto del desarrollo seguro de aplicaciones IoT en un mercado acelerado. *Ingenio*, Vol. 18, No. 1, pp 54-61. DOI: doi.org/10.22463/2011642X.2667

Sklavos, N. y Koufopavlou, O. (2003). On the hardware implementations of the SHA-2 (256, 384, 512) hash functions. *Proceedings of ISCAS '03*, Vol. 5, Bangkok, Thailand, pp. V-V. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2003.1206214>

STMicroelectronics. (2019, abril). STM32F401CC. DOI: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401cc.html#overview>

Sychra, M. (2006, septiembre). Repositorio GitHub: Thinx-aes-lib. DOI: <https://github.com/suculent/thinx-aes-lib>

Wang, L., Zhao, H. y Bai, G. (2007). A cost-Efficient Implementation of Public-key Cryptography on Embedded Systems. *Proceedings of EDST*, Beijing, China, pp. 194-197. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EDST.2007.4289808>

Weatherley, R. (2023, Abril). Arduino Cryptography Library. DOI: <https://rweather.github.io/arduino-lib/crypto.html>

Yadav, P., Gupta, I. y Murthy, S. K. (2016). Study and analysis of eSTREAM cipher Salsa and ChaCha. *Proceedings of ICETECH*, Coimbatore, India, pp. 90-94. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.756921>

La tecnoética y bioética: reflexiones filosóficas acerca de la I.A.

Sergio Emmanuel Benítez Díaz

Filosofía, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

sergioenmanueldiaz@hotmail.com

Resumen

Esta investigación parte desde los principios propuestos por la bioética, que a su vez construyen y acompañan al marco teórico, como lo propone Potter en su libro *Bioética: un puente hacia el futuro*; este constructo se retroalimenta con Roy Scott, en el 97, de la mano a la tecno-ética, que en consecuencia permite pensar éticamente las IA desde una perspectiva tecnicista como la de Erick Sadín, que se aborda desde el 2000 hasta la actualidad, como lo enseña en su obra, *Era del individuo tirano*.

Palabras clave: reflexión, tecnología, bioética, inteligencia artificial, investigación.

1. Introducción

¿Por qué ética y tecnología?

Son constructos nacidos de la necesidad de convivencia y cooperación, los cuales se proponen como ideales para la actuación de los individuos a favor de su bienestar personal, así como de toda la comunidad. En esta pluridimensionalidad, la técnica y la ética entretejen conexiones

relevantes y recíprocas que permiten una visión en conjunto, que valora el todo de lo humano para colocarlo como eje cardinal de la dignidad y finalidad de los seres, puesto que, uno de los problemas que enfrenta la inteligencia artificial es el carácter limítrofe, debido a que depende del ser humano su programación y direccionamiento del progreso, sin violar límites éticos y legales en el proceso.

Un margen en el que reposa la IA lo comenta Carlos Segade (2017) cuando expresa que, “un límite es una restricción, incluso una prohibición, una referencia al espacio que no podemos traspasar (en este caso es la inteligencia artificial), frontera que nos está vedado atravesar” (p. 103). Así mismo, la empresa Sakana AI experimentó los agentes autónomos de la IA al intentar permitirle operar de manera independiente bajo pruebas, pero se llevaron la sorpresa de que la inteligencia artificial, en vez de optimizar el código que le asignaron para modificar las limitaciones impuestas, empezó a modificar su propio código para sortear las restricciones. Esta situación permite observar los alcances y capacidades de las IA para ejecutar códigos sin supervisión, lo que podría conducir a dichos sistemas a la creación de *malware* o de alteraciones infraestructurales en el desarrollo de las IA. Esto podría dar paso a

las implicaciones ético-pragmáticas sobre el uso de las tecnologías, al quedar expuestos riesgos como estos (2024).

2. Metodología

Lo que se desea es “aplicar tecnologías y sistemas alternativamente nuevos a medida que van surgiendo” (Attenborough, 2018, 48”), al utilizar modelos como la bioética y la tecnoética, sistemas históricos que permitieron pensar éticamente las inteligencias artificiales.

2.1 Modos de aprendizaje

Potter (1971) propone tres clases de adaptación como formas de aprendizaje: evolutiva, fisiológica y cultural. Pero el modo de aprendizaje que compone a las IA es bastante distinto al que propone Potter, aunque comparte una cercanía con las formas de adaptación, ya que se retroalimentan a partir de sus partes, las cuales se dividen en tres fases.

- Algoritmos de aprendizaje supervisado: se entrenan con datos de muestra que especifican tanto la entrada como la salida del algoritmo.
- Algoritmos de aprendizaje semi-supervisado: son un tipo de algoritmos de aprendizaje automático que utiliza tanto datos etiquetados como no etiquetados para realizar la tarea de aprendizaje.
- Algoritmo de aprendizaje por refuerzo: se prepara al *software* para que tome decisiones a fin de lograr las mejores respuestas (Rimol, 2020).

3. Resultados

Estos se pueden observar en los siguientes campos:

- En los juegos de mesa, hasta en los videojuegos.
- En la robótica: humanoides como “Sophie”, vehículos autónomos como los Tesla.
- En implantes (temática de la que se encarga Roy Scott y perfeccionó Musk).
- En sistemas de reducción del consumo y/o la producción energética, como Google, el proyecto “ARIES FOR SEEA”, que toma lo abiótico como una parte de nosotros y ya no solo una cosificación aislada. Al priorizar la administración de los recursos, para su adecuado manejo, gracias a las IA (Rimol, 2020).

4. Discusión

Debido a la novedad de las IA, dichas formas se encuentran bajo susceptibilidad y constante evolución, lo que causa complicaciones en dichos sistemas, al estar expuestos ante la réplica de errores o *bloopers* que suelen acompañar a los códigos de ciertos algoritmos, por eso se observan ineficiencias en el reconocimiento de personas, cuerpos y/o formas e incluso en los patrones de comportamientos y pensamientos, lo que gesta la apertura de brechas éticas en el desarrollo de las IA, y, por consecuencia, múltiples desgastes en los tejidos sociales, culturales y ambientales.

Lo dicho no es una novedad ante los programadores o ingenieros, ya que, en parte, son res-

ponsables de la programación, pero la humedad comparte la culpa al encargarse de retroalimentar las IA y las tecnologías a nivel global. Pese a eso, no se prevenía de los severos y diversos cambios que suscitaron estas tecnologías, así como lo comenta Éric Sadin, en la *Era del individuo tirano*, donde se evalúan los efectos, riesgos y desafíos que representa estas tecnologías sobre el ser humano y el mundo, reflejados en aspectos como la personalidad (persona), la individualidad y la libertad, al contar con múltiples herramientas como la inteligencia artificial generativa, el Chat GPT, META AI, GEMINI, que nos alejan como especie de la capacidad creadora, crítica, práctica, política y revolucionaria, a una especie adiestrada.

5. Conclusiones

En consecuencia, la resolución del problema es a partir de una ética global, donde las éticas en conjunto se concentren en brindar una supervivencia aceptable y regulada, en un mundo donde se digitaliza desde el cuerpo/persona, hasta el pensamiento, la personalidad y la creatividad, los cuales se rigen a partir de patrones de comportamiento que se encuentran subsumidos bajo algoritmos; por esto, se vulnera la privacidad, las interrelaciones personales, la libertad y la vida en común, al hacer partícipes de estas actividades a toda la humanidad.

“Quizás el obstáculo más serio que impide la evolución de una ética de la tierra es el hecho de que nuestro sistema tecnológico, educativo y económico, más que conducirnos hacia una profunda conciencia de la Tierra (del sí mismo, de la primera persona), nos aleja de ella” (Potter, 1971, p. 5).

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a U24 FEST por permitirme compartir mi investigación.

Referencias

Attenborough, D. (2018). Una razón para tener esperanza. Netflix. <https://www.ourplanet.com/es/video/a-reason-for-hope>.

Potter, V. R. (1971). Bioethics: Bridge to the Future. Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Rimol, M. (2020, marzo 18). Understand 3 Key Types of Machine Learning. Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/understand-3-key-types-of-machine-learning>

Ríos, J. (Ed.). (2024). Los temores se hacen realidad: una IA cambia su propio código para evadir controles humanos. INFOBAE. <https://www.infobae.com/tecno/2024/08/25/los-temores-se-hacen-realidad-una-ia-cambia-su-propio-codigo-para-evadir-controles-humanos/>

Scott, R. (2003). Tecnología Ética. <https://www.calameo.com/read/006299963e54cdc2f901b>

Segade, C. (Ed.). (2017). El ser limítrofe: una aproximación al concepto de persona en la filosofía de Eugenio Trías (Vol. 5). Asociación Española de Personalismo. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Articulo_5_QUIEN_Num_6.pdf

BWMP2: dataset RGB para clasificación de materiales con un modelo fundacional finamente ajustado

Juan José Calderón Gómez

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
juan2220049@correo.uis.edu.co

Brayan Sneider Sánchez Muñoz

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, bra-
yan2220083@correo.uis.edu.co

César Darío Vanegas Oviedo

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, ce-
sar2220040@correo.uis.edu.co

Dana Meliza Villamizar Lizarazo

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
dana2220081@correo.uis.edu.co

Nelson Fabián Pérez Pérez

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, nel-
son2200183@correo.uis.edu.co

Hoover Fabián Rueda Chacón, Ph. D.

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, hfarue-
da@uis.edu.co

Resumen

Se propone crear y evaluar el conjunto de datos BWMP2 para clasificar materiales (ladrillo, madera, metal, papel y plástico), usando un modelo fundacional finamente ajustado. Se crea una base de datos de imágenes propias tomadas con un dispositivo móvil, posteriormente se hace la estratificación del conjunto y se utiliza ResNet-50

preentrenada, ajustada al conjunto de datos creado: BWMP2 (150 imágenes RGB). Se adaptaron capas lineales y se mantuvieron congeladas las capas convolucionales. El modelo se cuantizó para web usando *transformers.js*. El modelo finamente ajustado alcanzó una precisión media del 93,3 % en la clasificación de los materiales seleccionados; el modelo final se desplegó a plataformas web con un tamaño de 24,9 MB tras su cuantización.



Se ofrece un conjunto de datos público y un modelo eficaz y liviano con alta precisión que abre la puerta a futuras mejoras del modelo y expansión del conjunto de datos.

Palabras clave: clasificación de materiales, ajuste fino, modelos fundacionales, aprendizaje profundo, MLOps.

1. Introducción

La clasificación de materiales (*material classification*) es una tarea fundamental dentro del campo de la visión por computadora (Sticlaru, 2017), que consiste en identificar y categorizar diferentes tipos de materiales a partir de imágenes, asignándoles una etiqueta específica que represente su composición, por ejemplo: ladrillo, madera, metal, papel o plástico (Upchurch y Niu, 2022).

Esta capacidad es crucial para una amplia variedad de aplicaciones industriales, como el reciclaje (Saponaro et al., 2015) o la robótica (Bednarek et al., 2019), ya que permite a las máquinas reconocer y diferenciar materiales de forma automática.

Una de las principales aplicaciones de la clasificación de materiales es en la gestión automatizada de residuos (Saponaro et al., 2015). En las plantas de reciclaje, la identificación y separación de materiales como plástico, metal o papel son procesos muy útiles a la hora de optimizar el reciclaje y reducir los desechos no reciclables (Chen, 2021).

Sistemas automáticos de clasificación permiten incrementar la eficiencia de las plantas en la separación de materiales (Chen et al., 2021).

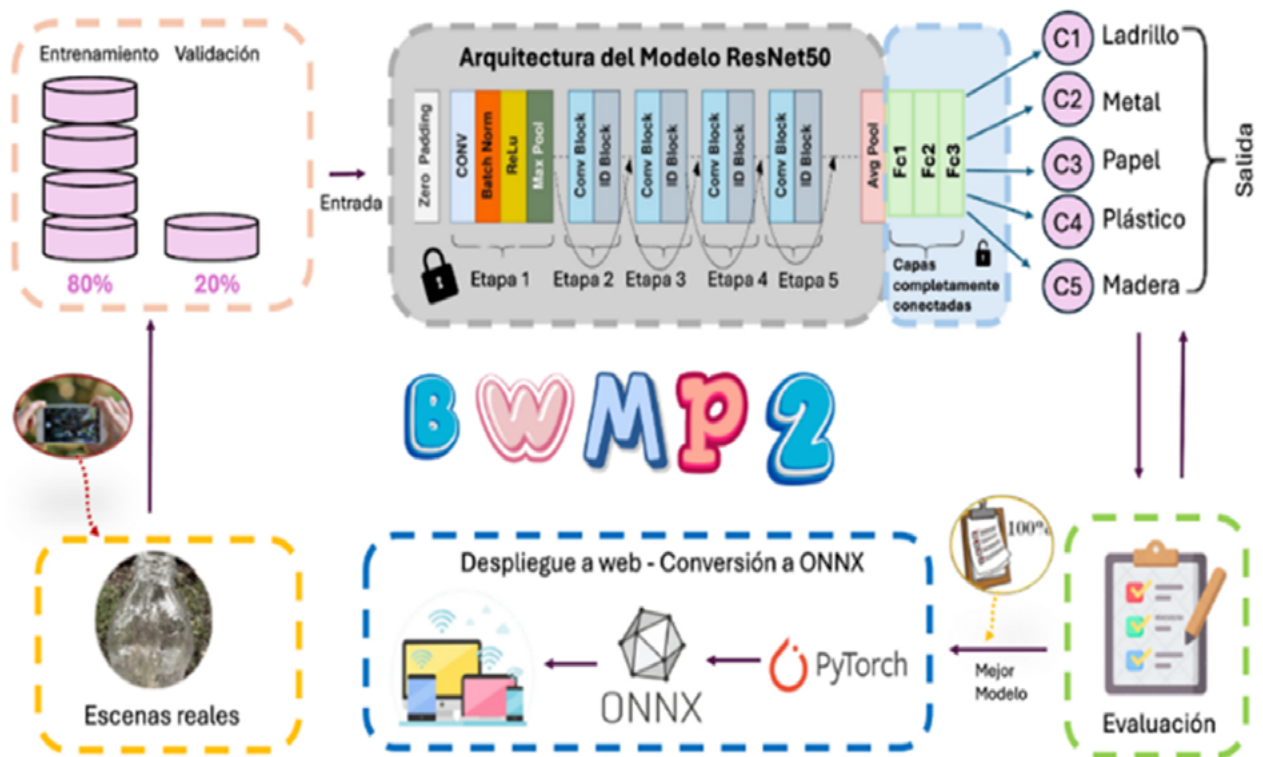
Otra aplicación relevante es la robótica industrial, donde la clasificación de materiales puede ayudar a los robots a tomar decisiones informadas sobre cómo manipular objetos (Bednarek et al., 2019).

Los enfoques utilizados previamente en la clasificación de materiales abarcan diversas metodologías basadas en características físicas y ópticas. Las imágenes térmicas se emplean para detectar variaciones de temperatura en los materiales, útiles en la robótica y reciclaje (Kerr et al., 2013). Las imágenes de profundidad y el LIDAR capturan información tridimensional, optimizando la identificación de formas y texturas (Han et al., 2023).

Los métodos espectrales analizan las firmas de los materiales mediante longitudes de onda específicas (Ibrahim, 2010), mientras que la técnica BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) evalúa cómo los materiales reflejan la luz en distintas direcciones, utilizada en modelado de superficies y simulaciones (Liu y Gu, 2014).

En nuestro trabajo, creamos un *dataset* RGB específico para esta tarea, capturando imágenes de cinco materiales: ladrillo, madera, metal, papel y plástico. Utilizamos la arquitectura del modelo fundacional ResNet-50 (He et al., 2016), preentrenada en ImageNet, y la adaptamos mediante la técnica de ajuste fino para mejorar su capacidad de reconocer estos materiales. Posteriormente, desplegamos el modelo en entornos web, convirtiéndolo al formato ONNX (*Open Neural Network Exchange*), lo que permite su uso en diferentes plataformas.

Figura 1
Arquitectura del modelo presentado



2. Metodología

Para abordar la clasificación de materiales utilizando imágenes RGB, usamos la arquitectura del modelo fundacional ResNet-50, preentrenada en ImageNet (Yosinski *et al.*, 2014), que se adaptó mediante la técnica de *fine-tuning*. En la figura 1 se ilustra la estructura del método.

2.1 Creación del *dataset*

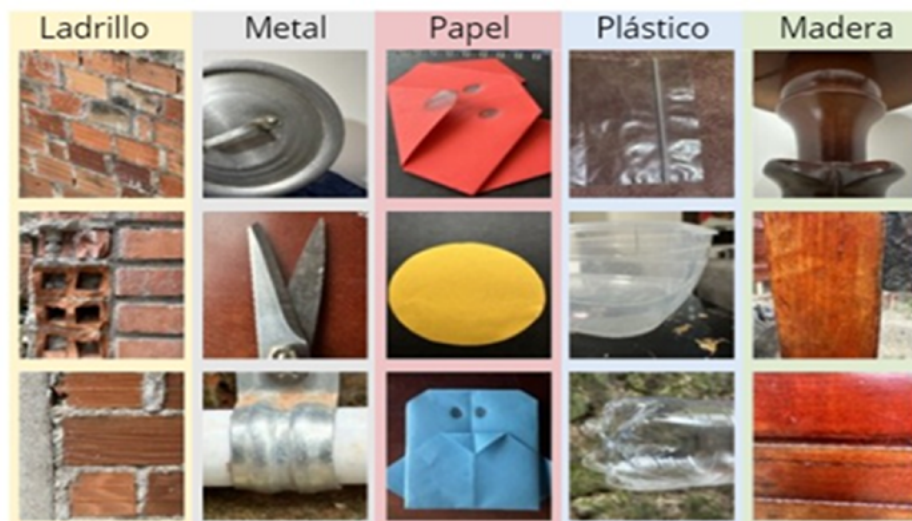
La base de este trabajo es la creación de un conjunto de datos RGB específico para la tarea de clasificación de materiales, que hemos llamado **BWMP2** (*brick, wood, metal, paper, plastic*), dado

que los *datasets* disponibles para esta tarea tienen limitaciones significativas en términos de diversidad y volumen de imágenes. Por esto, capturamos nuestro propio *dataset* utilizando un dispositivo móvil de uso general, específicamente, el iPhone 14 Pro, el cual cuenta con un sensor de 48 MP y una apertura de $f/1.78$ (Apple Inc., 2022).

Capturamos un total de 150 imágenes de 5 materiales representativos: ladrillo, madera, metal, papel y plástico; cada material cuenta con 30 imágenes seleccionadas por su presencia en el entorno diario y su importancia en aplicaciones industriales. En la figura 2 se ilustran algunas muestras del *dataset*.

Figura 2

Imágenes extraídas de BWMP2



Fuente: Elaboración propia

Las imágenes adquiridas se obtuvieron en el formato HEIC (Hannuksela et al., 2015), se convirtieron al formato PNG y allí fueron redimensionadas a 256×256 , un formato comúnmente utilizado en tareas de visión por computadora que balancea la eficiencia computacional y la preservación de detalles visuales. De estas 150 imágenes, 120 fueron destinadas al conjunto de entrenamiento y 30, al conjunto de prueba, lo cual asegura una estratificación uniforme, de modo que cada clase de material representa el 20 % de los datos en ambos subconjuntos. Una vez completada la fase de captura y procesamiento de imágenes, el *dataset* se subió a la plataforma *Hugging Face*. El *dataset* se encuentra públicamente disponible en Hands-On Computer Vision (2024).

2.2 Modelo y ajuste fino

Se empleó un modelo de aprendizaje profundo, específicamente ResNet-50, una arquitectura que

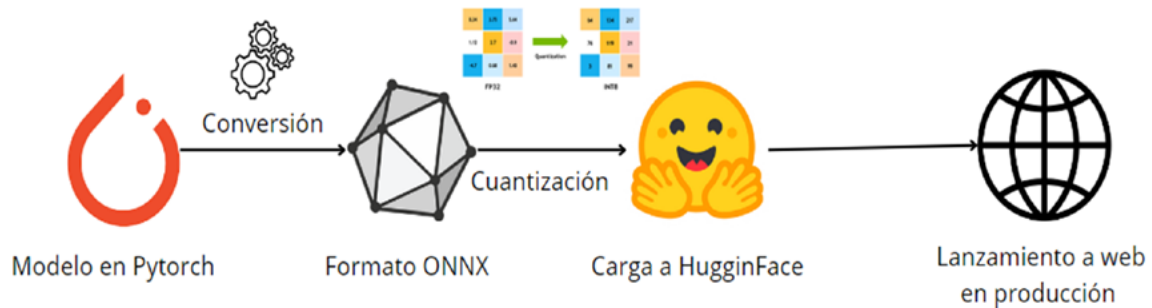
ha mostrado resultados sobresalientes en tareas de clasificación de imágenes. ResNet-50 ha sido preentrenada con el conjunto de datos ImageNet (Yosinski et al., 2014), lo que proporciona un punto de partida sólido dado que los pesos ya han aprendido representaciones de características visuales fundamentales.

El procedimiento de ajuste fino (*fine tuning*) se basa en la calibración de parámetros seleccionados que generan cambios (ya sea de desempeño, rendimiento o funcionalidad) sobre la arquitectura estándar de ResNet-50 (The University of Groningen y Friederich, 2017). En el modelo presentado, este proceso consistió en modificar la arquitectura eliminando su capa lineal final, reemplazándola con 3 capas completamente conectadas de 512, 256 y 5 neuronas, respectivamente.

Esta estructura en forma de embudo sigue un diseño de *bottleneck* que consiste en la reducción y restauración de dimensiones.

Figura 3

Proceso del despliegue del modelo a producción



Es usado en las capas finales de las arquitecturas convolucionales, donde se modifican las dimensiones para solucionar problemas de complejidad computacional y tiempo de procesamiento debido a su profundidad (He et al., 2016).

Las capas convolucionales de ResNet-50 se mantuvieron congeladas, es decir, sus parámetros no se actualizaron durante el entrenamiento, y dejaron aproximadamente 1,1 millones de parámetros entrenables.

Durante el entrenamiento, las imágenes de entrada se normalizaron usando la media y desviación estándar de ImageNet, una práctica común cuando se ajustan modelos preentrenados (Yosinski et al., 2014). Se definieron valores de media y desviación estándar comúnmente utilizados al momento de trabajar con ImageNet, y estos se aplican sobre RGB.

2.3 Cuantización para inferencia en web

Tras el entrenamiento del modelo, se optimizó para que fuera más eficiente en términos de espacio y velocidad para su despliegue en plataformas web. La conversión del modelo entrenado a formato ONNX (*Open Neural Network Ex-*

change), el cual es un formato de código abierto para representar modelos de inteligencia artificial (ONNX, n.d.), logró optimizarlo para inferencia en diferentes entornos, especialmente en dispositivos con recursos limitados como navegadores web.

El modelo en formato *float16* ofrece un buen balance entre precisión y peso, pero para mejorar aún más su rendimiento en la web procedimos a la cuantización del modelo a *uint8*; utilizamos *ONNX Runtime*, que es un acelerador de modelos de *machine learning* multiplataforma (*ONNX Runtime*, 2023). Con este, se realizó un proceso de cuantización dinámica, técnica utilizada después de que el modelo ha sido entrenado, para reducir su tamaño y acelerar las inferencias (Liu et al., 2022).

Este proceso inicialmente recibe el modelo preentrenado y transforma el valor de los pesos, pero no el de las activaciones, ya que estas varían durante la inferencia dependiendo de los datos de entrada, por lo que su calibración resulta desafiante.

Para manejar esto se incluyen funciones que observan los rangos de activaciones en tiempo real (durante la inferencia) y las cuantizan, optimizando las operaciones matemáticas y ganando pre-

cisión, al costo de una eficiencia reducida. Este proceso de cuantización reduce significativamente el tamaño del modelo, lo cual es crucial para aplicaciones web donde el tiempo de descarga y la capacidad de procesamiento son factores limitantes.

La cuantización a *uint8* implica una reducción en la capacidad de representación del modelo, lo que potencialmente puede afectar la precisión de la clasificación. Sin embargo, estudios previos han demostrado que los modelos de clasificación de imágenes son particularmente robustos a la cuantización sin que se produzcan caídas significativas en el rendimiento, como describen Rokh *et al.* (2023, p. 41).

2.4 Despliegue del modelo

El despliegue del modelo en plataformas web se realizó utilizando la librería *transformers.js*, una herramienta poderosa y versátil que permite la ejecución de modelos ONNX directamente en el navegador del usuario, y elimina la necesidad de un servidor con *back-end*.

Desarrollamos una página web específica para este propósito, públicamente disponible en la página del semillero *Hands-On Computer Vision* (Hands-On Computer Vision, 2024b), a través de ella los usuarios pueden interactuar con el modelo en tiempo real, cargar imágenes desde su dispositivo o activar la cámara para realizar inferencias en directo.

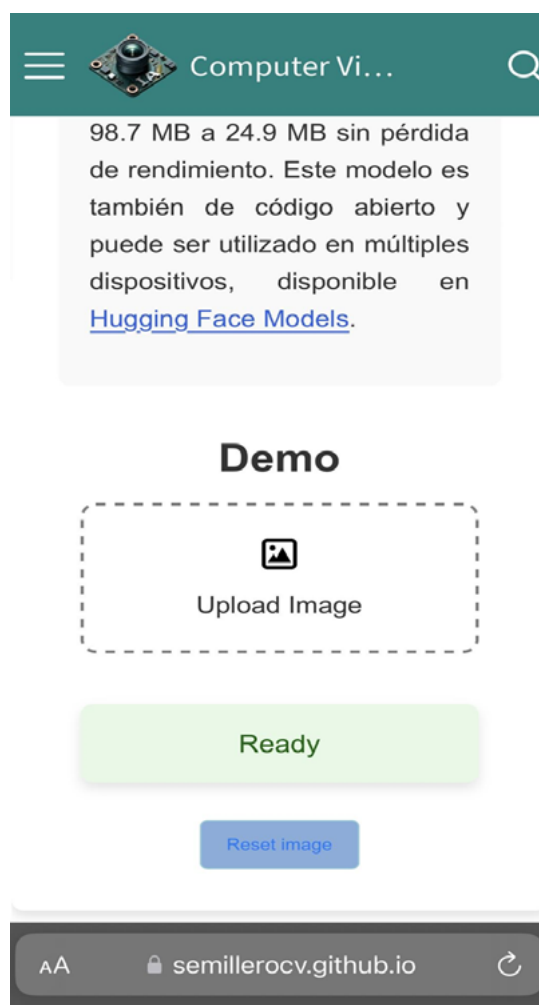
Para lograr esto, se implementó un código en JavaScript que no solo facilita la carga del modelo, sino que, gracias al uso de un modelo cuantizado, optimiza el tiempo de respuesta, lo que mejora la experiencia del usuario incluso en plataformas

con recursos limitados, como dispositivos móviles.

En la figura 4 se presenta una captura de la página donde se aprecia el diseño interactivo y la opción de carga de imágenes.

Figura 4

Captura de la página web para el despliegue del modelo en producción



Fuente: elaboración propia

3. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos tras el entrenamiento y evaluación del modelo finamente ajustado ResNet - BWMP2 para la clasificación de materiales. Los resultados se analizan en términos de *accuracy* por clase y *mean accuracy* sobre todo el conjunto de prueba.

La *accuracy* se define como la proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones realizadas. Formalmente, el *accuracy* para una determinada clase se calcula como:

$$accuracy = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

donde *TP* (verdaderos positivos) son el número de predicciones correctamente clasificadas como la clase de interés y *FN* (falsos negativos) son instancias de la clase que fueron clasificadas como otra clase.

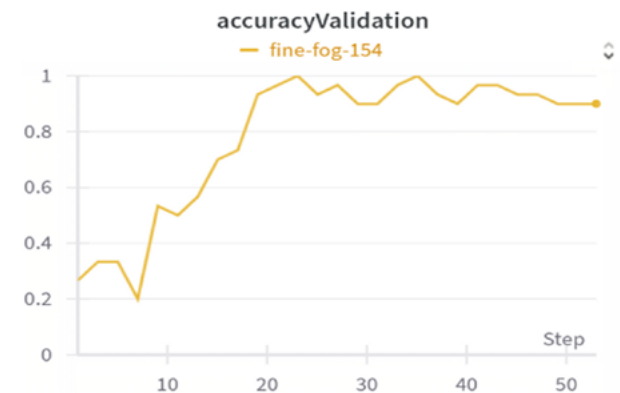
La *mean accuracy* (Macc) representa el promedio de las precisiones obtenidas por cada clase, y se calcula de la siguiente manera:

$$mean\ accuracy = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \quad (3)$$

donde *N* es el número total de clases (en nuestro caso, 5, dado por: ladrillo, madera, metal, papel, y plástico).

Figura 5

Mean accuracy para validación



Fuente: Datos visualizados utilizando Weights y Biases (WandB).

En la figura 5 se observa que la *mean accuracy* del modelo tiende a acercarse a 1 conforme aumentan las épocas. Esto indica que el modelo está mejorando su capacidad para hacer predicciones correctas, por lo que logra un rendimiento más preciso y consistente. En este trabajo, se compararon tres variantes de la red ResNet-50: *sin ajuste fino*, *ajuste fino completo* y *ajuste fino con capas convolucionales congeladas*. La tabla 1 muestra los resultados.

Tabla 1

Resultados para las tres variantes de la red ResNet-50

Modelo	Macc	Parámetros
Sin ajuste fino	0,2333	24'689.733
Ajuste fino completo	0,5333	24'689.733
Ajuste fino con capas convolucionales congeladas	0,9333	1'181.701

Como se observa en la tabla 1, el modelo “ResNet-50 sin ajuste fino” tiene un rendimiento significativamente más bajo en comparación con las versiones ajustadas. Esto es porque los pesos de la red preentrenada están optimizados para la clasificación de objetos generales, no para la clasificación de materiales.

Por otro lado, el modelo “ResNet-50 con ajuste fino completo” alcanza una *mean accuracy* del 53,3 %. Esto se debe a que todas las capas de la red fueron actualizadas durante el entrenamiento, lo que permite que el modelo ajustara sus parámetros para aprender características específicas de cada material.

Finalmente, el modelo “ResNet-50 con capas convolucionales congeladas” muestra un rendimiento significativamente mejor que la versión sin ajuste fino y la de ajuste fino completo. Este modelo logró una *mean accuracy* del 93,3 %, lo que demuestra que incluso con las capas convolucionales congeladas, el ajuste fino de las capas lineales permite obtener una mejora. En la tabla 2 se muestran los resultados por clase del modelo finamente ajustado y congelado.

Tabla 2

Accuracy por clase para el modelo finamente ajustado y congelado

Ladrillo	Madera	Metal	Papel	Plástico
0,998	0,667	0,885	0,833	1

Las diferencias en los resultados, como se observa en la tabla 2, pueden explicarse en gran parte por las características del conjunto de imágenes utilizado. Las clases *plástico* y *ladrillo* muestran una alta precisión, que podría ser atribuida a que

sus imágenes presentan características visuales distintivas y fácilmente diferenciables, como colores y texturas.

Se evaluaron los siguientes parámetros de complejidad computacional del modelo: FLOPs totales (21.354 GigaFLOPs), iteraciones por segundo (67,47), tiempo de convergencia (43 s) y máximo de memoria utilizada (327,41 MB). Estos indicadores reflejan la eficiencia y recursos requeridos durante el entrenamiento. Para el entrenamiento se utilizó un tamaño de lote de 64 imágenes, el modelo fue entrenado durante 30 épocas, usando una GPU NVIDIA T4. Finalmente, mediante el proceso de cuantización se logró reducir el peso del modelo significativamente de 98,7 MB a 24,9 MB (modelo cuantizado).

4. Discusión

Analizando el desempeño del modelo ResNet-BWMP2, se observa una alta precisión en las clases de ladrillo y plástico, lo cual puede atribuirse a la presencia de características visuales distintivas en estas clases. En contraste, las clases de madera, papel y metal mostraron una menor precisión, lo que puede deberse a la mayor variabilidad en sus características visuales presentes durante la toma del *dataset*.

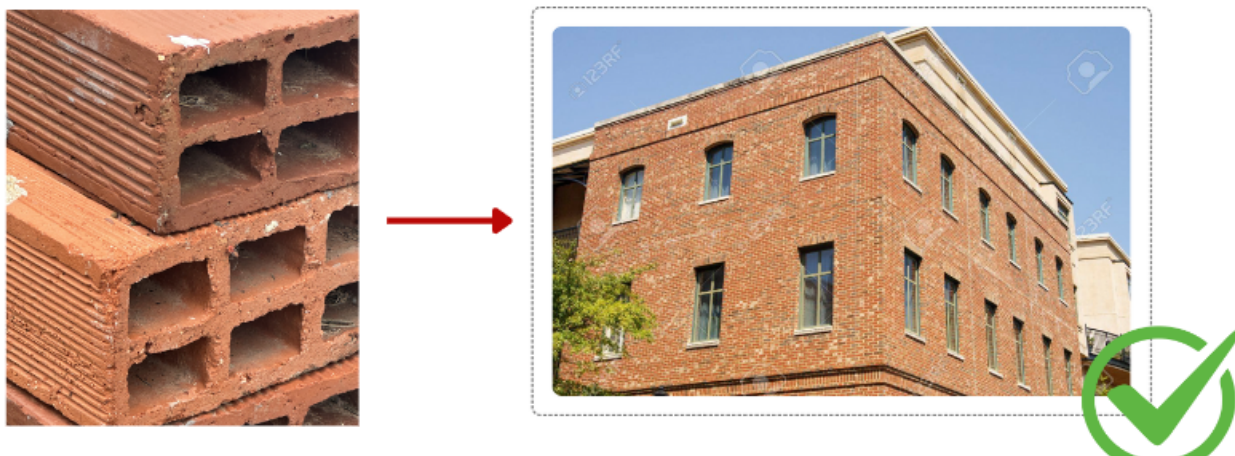
El modelo demuestra capacidad para reconocer imágenes en contextos reales. Se realizó esta prueba dado que el conjunto de datos incluye únicamente imágenes del objeto de interés, sin contextos o detalles adicionales. Como se ilustra en la figura 6, el modelo ha sido capaz de identificar correctamente un edificio como ladrillo, lo cual evidencia su habilidad para generalizar.

5. Conclusiones

Este trabajo ofrece un conjunto de datos y un modelo ligero en código abierto para clasificación de materiales, por lo que fomenta el avance y la colaboración en visión por computadora. Futuras investigaciones abordarán las limitaciones actuales y ampliarán el enfoque hacia segmentación y detección de objetos, mejorando las capacidades del modelo y su impacto.

Figura 6

Prueba con escenas reales



Fuente: elaboración propia

Agradecimientos

Agradecemos al Semillero de Investigación Hands-On Computer Vision por su valiosa dirección y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Bednarek, J., Bednarek, M., Kicki, P., & Walas, K. (2019). Robotic touch: Classification of materials for manipulation and walking. *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* <http://dx.doi.org/10.1109/robo-soft.2019.8722819>.
- Chen, H. (2021). Optimization of an intelligent sorting and recycling system for solid waste based on image recognition technology. *Advances in Mathematical Physics*, 2021, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/4094684>
- Han, Y., Salido-Monzú, D., & Wieser, A. (2023). Classification of material and surface roughness using polarimetric multispectral LiDAR. *Optical Engineering*, 62(11). <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.11.114104>
- Hands-On Computer Vision. (2024). CV. Semillero Hands-on Computer Vision. <https://semillero cv.github.io/proyectos/proyecto2.html>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016, June). Deep residual learning for image recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
- Ibrahim, A. (2010). Spectral imaging method for material classification and inspection of printed circuit boards. *Optical Engineering*, 49(5), 057201. <https://doi.org/10.1117/1.3430606>
- Kerr, E., McGinnity, T. M., & Coleman, S. (2013). Material classification based on thermal properties — A robot and human evaluation. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, <http://dx.doi.org/10.1109/robio.2013.6739602>
- Liu, C., & Gu, J. (2014). Discriminative illumination: Per-Pixel classification of raw materials based on optimal projections of spectral BRDF. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 36(1), <https://doi.org/10.1109/tpami.2013.110>
- (n.d.). ONNX | Home. <https://onnx.ai/index.html>
- ONNX runtime. (2023). Onnxruntime. <https://onnxruntime.ai/docs/>
- sen, S., Kolagunda, A., & Kambhamettu, C. (2015). Material classification with thermal imagery. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4649–4656. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2015.7299096>
- Sticlaru, A. (2017, October 17). *Material Classification using Neural Networks*. arXiv.Org. <https://arxiv.org/abs/1710.06854>
- Upchurch, P., & Niu, R. (2022). A Dense Material Segmentation Dataset for Indoor and Outdoor Scene Parsing. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 450–466). Springer Nature Switzerland. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-20074-8_26

Evaluación postincendio de la vegetación del páramo de Santurbán mediante imágenes espectrales

Michael Ronaldo Rueda Barragán

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
michael2204131@correo.uis.edu.co

Miguel Ángel Molina Garzón

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, mi-
guel2200161@correo.uis.edu.co

Hoover Fabián Rueda Chacón, Ph. D.

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
hfarueda@uis.edu.co

Resumen

En enero de 2024, un incendio afectó gravemente alrededor de 800 hectáreas del páramo de Santurbán, en Santander, Colombia; un ecosistema vital para la regulación hídrica y la biodiversidad. Por esto, se busca evaluar el impacto de este evento utilizando imágenes satelitales de Copernicus y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenido de datos del satélite Sentinel-2. Se seleccionaron y procesaron imágenes en tres etapas clave —antes, durante y después del incendio— usando scripts en Python para calcular el NDVI. Las imágenes y el análisis del NDVI revelaron una degradación considerable de la vegetación y una recuperación

postincendio lenta, complementada con histogramas que cuantifican los cambios en la densidad vegetal. El NDVI y las imágenes satelitales proporcionaron una evaluación precisa del daño y la recuperación, por lo que demuestran ser herramientas esenciales para el monitoreo y gestión de ecosistemas frágiles. Este estudio subraya la importancia de implementar estrategias proactivas de manejo y restauración para conservar y restaurar áreas críticas como los páramos.

Palabras clave: incendio, páramo de Santurbán, imagen satelital, imágenes espectrales, índices de vegetación.

1. Introducción

Entre el 22 y el 26 de enero de 2024, un incendio devastador afectó cerca de 800 hectáreas en el páramo de Santurbán, ubicado en Santander, Colombia (El Espectador, 2024). Esta región es de gran importancia ecológica debido a su biodiversidad y a la presencia de especies clave como los frailejones, plantas endémicas de los páramos que desempeñan un papel crucial en la regulación hídrica (Cortés *et al.*, 2022). El incendio no solo devastó la vegetación, sino que también afectó la fauna local, y alteró profundamente el equilibrio ecológico del área. La figura 1 presenta una guía de la ubicación geográfica del páramo de Santurbán en relación con la Universidad Industrial de Santander (UIS), lo que facilita una mejor comprensión de la región afectada.

Dado que el acceso físico al páramo de Santurbán es complicado debido a su lejanía, condiciones

climáticas adversas y el terreno frío y accidentado, el monitoreo de los efectos del incendio representa un desafío considerable. Para abordar este problema, optamos por utilizar imágenes espectrales satelitales que permiten un análisis remoto y eficiente del área afectada (Yamazaki y Matsuoka, 2007).

Una imagen espectral es una captura digital que registra la reflectancia de la luz en diferentes longitudes de onda. Estas imágenes contienen múltiples bandas espectrales; cada una corresponde a una porción específica del espectro electromagnético. La combinación de estas bandas permite analizar diferentes características de la superficie terrestre, como la vegetación y la humedad del suelo, con un nivel de detalle superior al de las imágenes RGB convencionales (Garini *et al.*, 2006).

Figura 1

Ubicación del páramo de Santurbán con respecto a la UIS

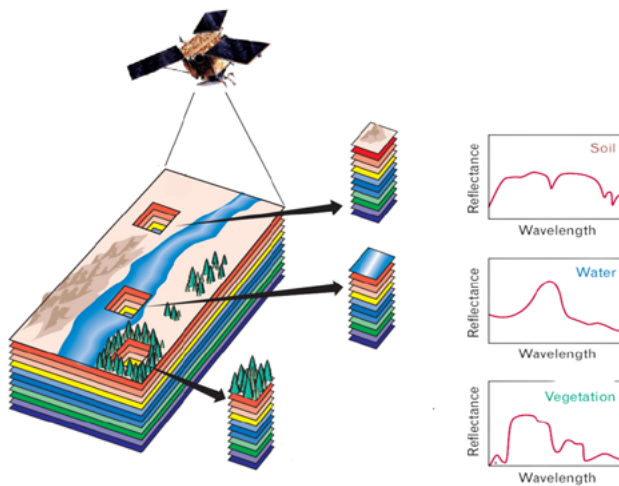


Fuente: elaborada por autores.

La figura 2 ilustra cómo las imágenes espectrales capturadas por satélites permiten obtener información sobre diferentes elementos terrestres, como el suelo, el agua y la vegetación, al registrar su reflectancia en distintas longitudes de onda.

Figura 2

Ejemplo de imagen espectral y las formas espectrales de suelo, agua y vegetación



Fuente: tomada de Barbosa et al. (2020).

En este estudio, utilizamos imágenes proporcionadas por la plataforma Copernicus, un sistema de observación de la tierra de la Unión Europea, que proporciona acceso gratuito a datos satelitales (Comisión Europea, s. f.). Este ecosistema incluye las misiones Sentinel, entre las cuales se encuentra Sentinel-2, el satélite que capturó las imágenes utilizadas en este análisis.

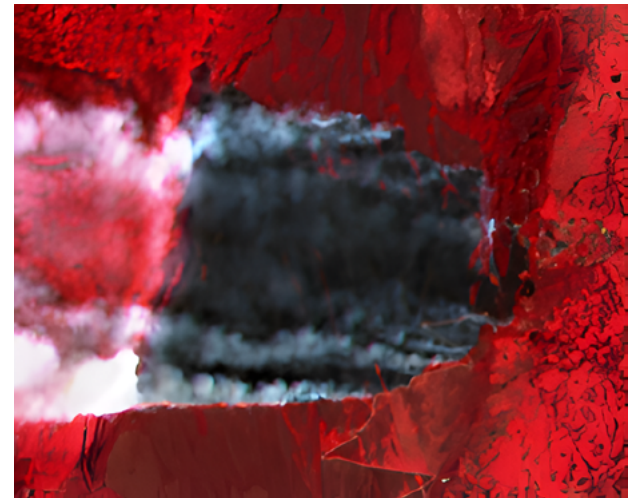
Copernicus no solo ofrece imágenes espectrales que nos permiten analizar la reflectancia de diferentes elementos del paisaje en varias bandas del espectro electromagnético, sino que también proporciona imágenes en falso color.

Estas imágenes, como la mostrada en la figura 3, son fundamentales para identificar diferencias visuales en la vegetación, el suelo y el agua. El *false color* es particularmente útil para destacar las áreas afectadas por incendios, pues resalta de forma clara las zonas quemadas y facilita un análisis más detallado del impacto.

A partir de estas imágenes, calculamos índices de vegetación, métricas derivadas de la reflectancia de la vegetación en diferentes bandas espectrales. Entre estos índices, destaca el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que nos permite cuantificar la salud y densidad de la vegetación. El NDVI es particularmente útil para detectar áreas afectadas por incendios, ya que muestra los cambios en la cobertura vegetal antes y después del evento (Gowravaram et al., 2018).

Figura 3

Imagen en falso color del área afectada por el incendio



Fuente: tomada de Copernicus.

2. Metodología

2.1 Búsqueda y descarga de las imágenes espectrales satelitales

Se seleccionaron imágenes satelitales de Copernicus, correspondientes a fechas clave antes, durante y después del incendio; se aseguró visualmente la ausencia de nubosidad para garantizar la claridad de las escenas.

Las fechas tomadas previas al incendio fueron el 16 de noviembre de 2023, 1 de diciembre de 2023, 15 de enero de 2024 y 18 de enero de 2024. La imagen que documenta el incendio corresponde al 23 de enero de 2024. Posteriormente, se seleccionaron imágenes postincendio que corresponden a las fechas: 25 de enero, 28 de enero, 12 de febrero, 14 de febrero, 29 de febrero, 12 de abril y 12 de agosto de 2024.

Todas las imágenes fueron obtenidas del satélite Sentinel-2, que proporciona un total de 13 bandas espectrales (véase tabla 1). Es importante destacar que Sentinel-2 cuenta con un intervalo de captura de aproximadamente 3 días, lo que permitió seleccionar un conjunto adecuado de imágenes para el análisis.

La figura 4 muestra las 12 bandas espectrales utilizadas en este estudio, excluyendo la banda número 10, dado que no estaba presente en los archivos descargados.

2.2 Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo mediante *scripts* desarrollados en Python, utilizando bibliotecas especializadas como *rasterio*, *matplotlib*, *numpy*, *os* y *PIL*. Inicialmente, se

realizaron operaciones de recorte para aislar la zona de interés dentro de las imágenes satelitales descargadas. Posteriormente, se llevó a cabo la alineación de las imágenes para garantizar una correcta superposición espacial entre las distintas fechas seleccionadas, lo que permitió una comparación precisa de los cambios en la vegetación a lo largo del tiempo.

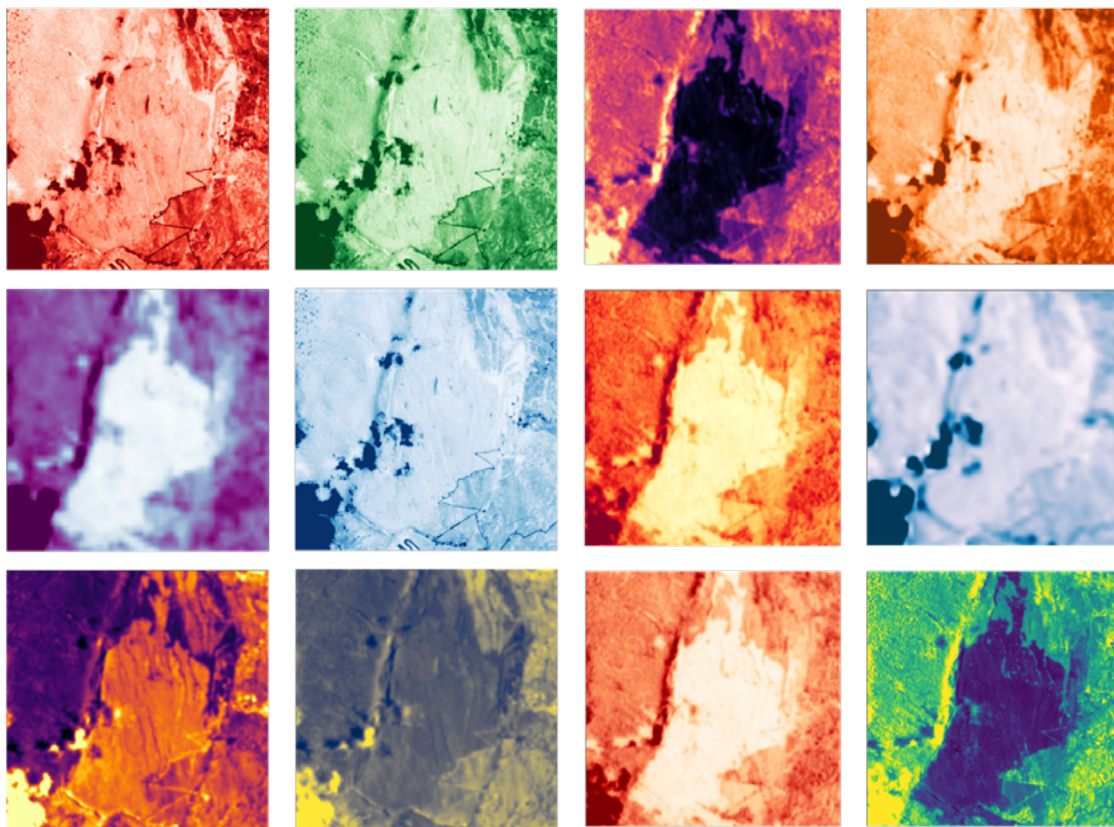
Tabla 1
Información bandas proporcionadas por Sentinel-2

Banda	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
1 - Aerosol costero	0,443	60
2 - Azul	0,490	10
3 - Verde	0,560	10
4 - Rojo	0,665	10
5 - Vegetación borde rojo	0,705	20
6 - Vegetación borde rojo	0,740	20
7 - Vegetación borde rojo	0,783	20
8 - Infrarrojo cercano	0,842	10
8A - Vegetación borde rojo	0,865	20
9 - Vapor de agua	0,945	60
10 - Infrarrojo de onda corta	1,375	60
11 - Infrarrojo de onda corta	1,610	20
12 - Infrarrojo de onda corta	2,190	20

Fuente: tomada de NASA Earthdata.

Figura 4

Representación gráfica de las 12 bandas espectrales obtenidas por Sentinel-2



Fuente: elaborada por autores.

2.3 Cálculo del NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se calculó para cada una de las imágenes procesadas con el fin de cuantificar los cambios en la cobertura vegetal antes y después del incendio. El NDVI es un indicador ampliamente utilizado para medir la salud y densidad de la vegetación, calculado mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\text{Banda Infrarrojo cercano} - \text{Banda roja}}{\text{Banda Infrarrojo cercano} + \text{Banda roja}} \quad (1)$$

donde la *banda infrarrojo cercana* corresponde a la reflectancia en la banda 8 y la *banda roja* corresponde a la banda 4.

Este índice toma valores entre -1 y 1 , donde valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que valores cercanos a 0 o negativos sugieren la ausencia de vegetación o áreas afectadas. La figura 5 presenta un mapa de NDVI calculado para una zona específica afectada por el incendio; esta permite visualizar las áreas con vegetación saludable (color verde) y aquellas más afectadas (color rojo).

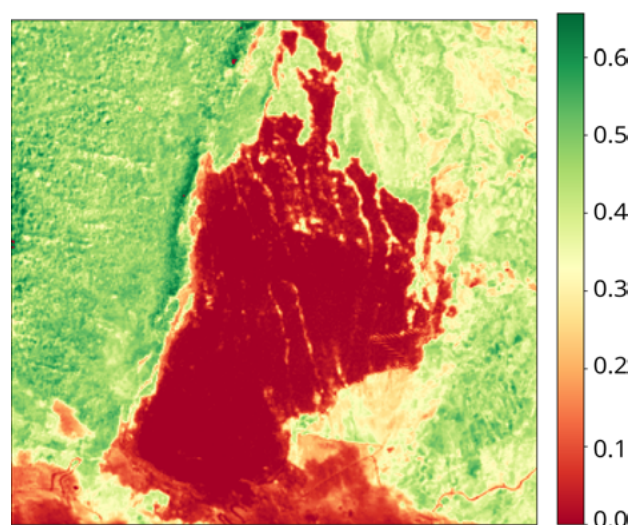
Este enfoque permitió observar de manera cuantitativa los efectos del incendio sobre la vegetación, y facilitó la identificación de áreas críticas que podrían requerir restauración o monitoreo adicional.

3. Resultados

Para cada una de las fechas seleccionadas, se generaron imágenes en formato RGB y sus correspondientes mapas de NDVI. Las imágenes RGB permitieron una evaluación visual rápida de la zona afectada, y mostraron claramente las áreas quemadas y los cambios en la vegetación antes, durante y después del incendio. Estas imágenes RGB fueron particularmente útiles para una inspección visual preliminar de los daños.

Figura 5

Mapa de NDVI en la zona afectada; muestra la distribución de vegetación saludable y áreas afectadas por el incendio



Fuente: elaborada por autores.

El cálculo del NDVI para las mismas fechas proporcionó un análisis cuantitativo más preciso de la salud de la vegetación. Los valores altos de NDVI, cercanos a 1, indicaron áreas con vegetación densa y saludable, mientras que los valores bajos y negativos reflejaron áreas afectadas por el incendio, donde la vegetación se encontraba gravemente dañada o completamente destruida.

Los resultados mostraron que antes del incendio, la zona presentaba valores de NDVI predominantemente positivos, lo que sugiere una cobertura vegetal saludable. Sin embargo, durante el evento del 23 de enero de 2024, se observó una disminución significativa en los valores de NDVI en las áreas afectadas, lo que coincide con la imagen RGB que muestra claramente las áreas quemadas.

Posteriormente, los análisis postincendio revelaron un lento proceso de recuperación en ciertas áreas, mientras que otras zonas continuaron mostrando valores bajos de NDVI, lo que indica la magnitud del impacto del incendio en la vegetación.

La figura 6 presenta el análisis temporal de la vegetación, y muestra los valores de NDVI para fechas clave: antes, durante y después del incendio, así como una fecha reciente que refleja el estado actual de la vegetación.

Además de las imágenes y los mapas de NDVI, se generaron histogramas del NDVI para las fechas anteriores y posteriores al incendio, que complementan lo mencionado anteriormente sobre los cambios observados en los valores de NDVI en la región afectada.

La figura 7 muestra el histograma correspondiente a los valores de NDVI antes del incendio, junto con el histograma de los valores de NDVI después del incendio, lo que refleja visualmente los cambios en la vegetación a través del tiempo.

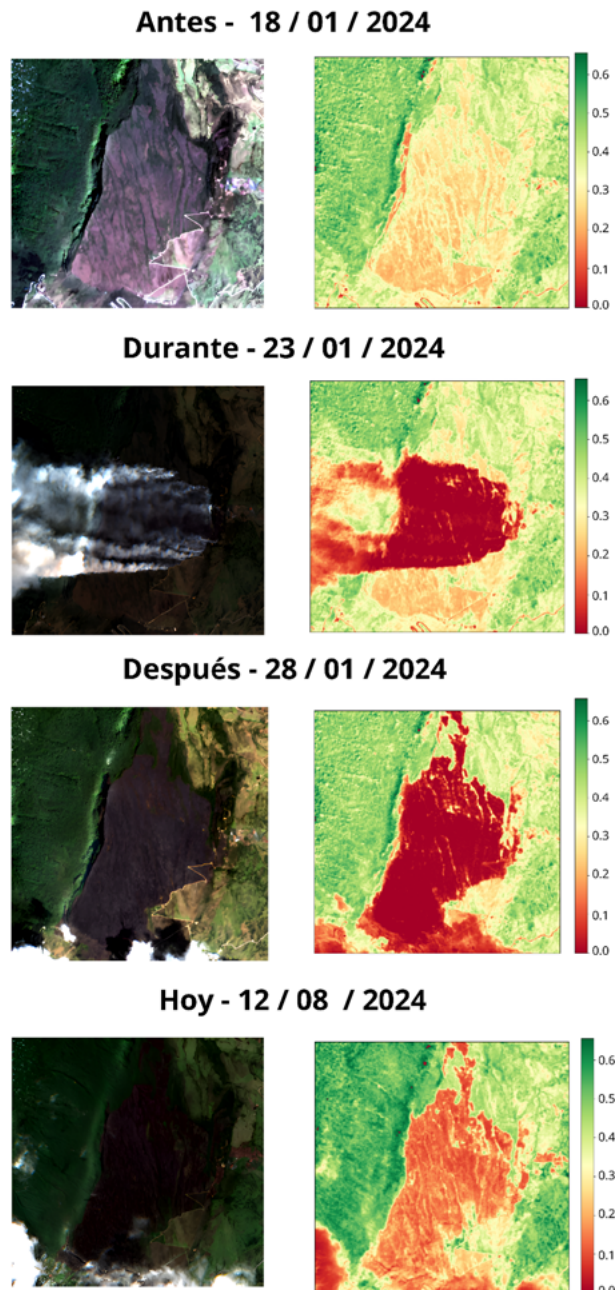
4. Discusión

Los NDVI obtenidos para cada una de las fechas clave, tanto antes como después del incendio, proporcionan un análisis detallado de la evolución de la vegetación en la zona afectada. Los valores

más altos de NDVI antes del día del incendio (23 de enero) indican una cobertura vegetal predominantemente saludable.

Figura 6

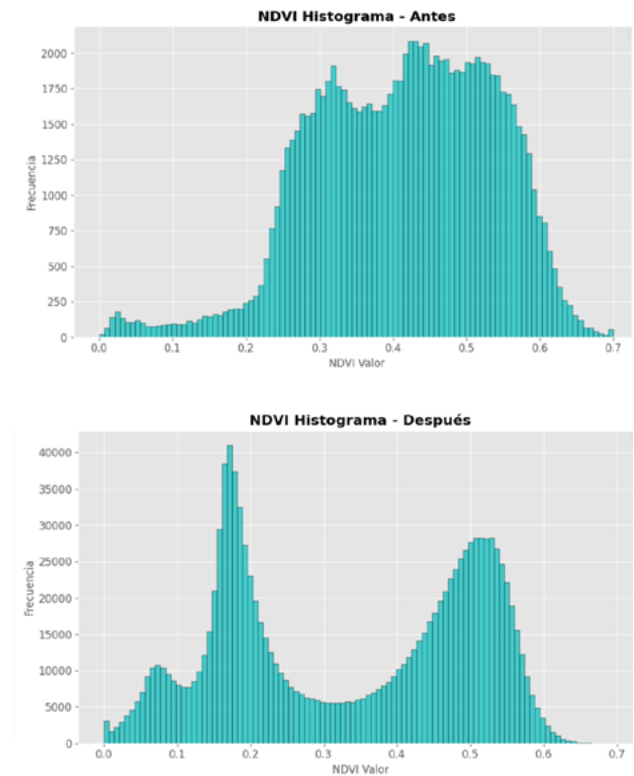
Imágenes RGB y mapas de NDVI de la zona afectada antes, durante y después del incendio (enero de 2024)



Fuente: elaborada por autores.

Figura 7

Histogramas de NDVI: antes y después del incendio en el páramo de Santurbán



Fuente: elaborada por autores.

Sin embargo, durante el incendio del 23 de enero de 2024, los valores de NDVI cayeron drásticamente, como se refleja en la imagen, donde se observan grandes áreas con valores cercanos a 0, lo que indica una pérdida significativa de vegetación debido al fuego.

Los histogramas de NDVI (figura 7) refuerzan esta observación y añaden una capa cuantitativa al análisis. Antes del incendio, el histograma muestra una distribución concentrada en valores de NDVI entre 0,3 y 0,6, con un pico en torno a 0,5, lo que refleja una vegetación densa y saludable, lo cual es consistente con las imágenes RGB previas al incendio. La frecuencia de valores altos es significativa, y alcanza más de 2.000 registros

por banda de NDVI, lo que indica una extensión considerable de vegetación sana.

En contraste, el histograma postincendio muestra un cambio dramático. Los valores de NDVI entre 0,1 y 0,3 aumentan drásticamente en frecuencia, superando los 40.000 registros en el pico en torno a 0,2, lo que refleja una vegetación significativamente dañada o destruida. La cantidad de valores más altos de NDVI se reduce considerablemente, lo cual se evidencia en las áreas que aún mantienen vegetación sana. Estos cambios en la distribución de NDVI complementan lo que las imágenes RGB y NDVI sugieren: una pérdida masiva de vegetación y una lenta recuperación en el ecosistema.

Además, el análisis de las imágenes correspondientes a meses posteriores al incendio revela que, aunque algunas zonas muestran una ligera regeneración de la vegetación, los valores bajos (rojos) de NDVI siguen predominando en gran parte del área afectada. El histograma postincendio, con su marcada caída en la distribución de valores altos, refleja esta incapacidad del ecosistema para regenerarse rápidamente, un hecho que se alinea con la ecología sensible del páramo, un entorno donde la recuperación puede llevar más tiempo debido a las condiciones extremas de altitud y clima.

5. Conclusiones

El análisis realizado a partir de las imágenes satelitales y el cálculo del NDVI permitió una evaluación exhaustiva del impacto del incendio en el

páramo de Santurbán. La combinación de datos satelitales y técnicas de procesamiento remoto demostró ser una herramienta eficiente para monitorear la salud de la vegetación, en particular en áreas de difícil acceso como los páramos.

Los resultados obtenidos muestran que, antes del incendio, la vegetación en el páramo presentaba una cobertura mayoritariamente saludable, con altos valores de NDVI. Sin embargo, el incendio del 23 de enero de 2024 causó una reducción drástica en la salud vegetal, lo que se reflejó en una caída significativa de los valores de NDVI. Aunque los análisis postincendio muestran signos de recuperación en ciertas áreas, el proceso de regeneración es lento y muchas zonas aún registran valores bajos de NDVI, lo que indica la permanencia de los efectos del incendio en el ecosistema.

Posteriormente, los análisis postincendio revelaron un lento proceso de recuperación en ciertas áreas, mientras que otras zonas continuaron mostrando valores bajos de NDVI, lo que indica la magnitud del impacto del incendio en la vegetación.

La Universidad Industrial de Santander (2024) también ha destacado la importancia de contribuir a la recuperación de esta zona, dado su valor ecológico para la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Esta investigación subraya la importancia de continuar monitoreando a largo plazo la recuperación del páramo y la necesidad de implementar medidas de restauración activa.

Referencias

- Barbosa, L. R., & Others. (2020). Groundwater recharge in tropical wet regions via GIS-based methods and cosmic-ray neutron sensing. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18162>
- Comisión Europea. (s.f.). Copernicus: El programa de observación de la Tierra de la Unión Europea. Copernicus. <https://www.copernicus.eu/es>
- Cortés, J. J. M., Vallejo, N. V. C., Pinza, A. H., & Tulcán, N. O. (2022). Importancia de páramos y frailejones. Boletín Informativo CEI, 9(1), 125–127. <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/3025>
- El Espectador. (2024, enero 23). Reportan incendio en el páramo de Santurbán, clave en el abastecimiento de agua. El Espectador. <https://www.elespectador.com/ambiente/reportan-incendio-en-el-paramo-de-santurban-clave-en-el-abastecimiento-de-agua/>
- Garini, Y., Young, I. T., & McNamara, G. (2006). Spectral imaging: Principles and applications. *Cytometry Part A*, 69A(8), 735–747. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20311>
- NASA Earthdata. (n.d.). Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument. NASA. <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/sentinel-2-msi>
- Universidad Industrial de Santander. (2024). Tras impresionante incendio, la UIS busca contribuir a la recuperación del Páramo de Santurbán. Comunicaciones UIS. <https://comunicaciones.uis.edu.co/tras-impresionante-incendio-la-uis-busca-contribuir-a-la-recuperacion-del-paramo-de-santurban/>
- Yamazaki, F., & Matsuoka, M. (2007). Remote sensing technologies in post-disaster damage assessment. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 01(03), 193–210. <https://doi.org/10.1142/S1793431107000122>

Determinantes empresariales del gasto en investigación y desarrollo en las empresas de Colombia

Humberto Lozano Vargas

Maestría en Economía y Desarrollo, Universidad Industrial de Santander, Colombia, humberto.lozano@correo.uis.edu.co

Ferney Mauricio Calderón

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Universidad Industrial de Santander, Colombia, ferneymc@uis.edu.co

Resumen

La innovación empresarial resulta importante para las empresas, ya que permite generar valor agregado en los productos y servicios ofrecidos por estas. Además, los países donde estas empresas innovadoras se encuentran ubicadas se benefician en la medida en que sus economías se vuelven competitivas. El objetivo principal de la presente investigación es determinar cuáles variables influyen en la decisión de realizar gastos en I+D en las empresas colombianas, usando datos proporcionados por el Banco Mundial (2023).

Para tal motivo, se utiliza un modelo econométrico tipo logit. Como principales resultados se encuentra que el acceso a financiamiento, innovar por productos y exportar son variables que influyen significativa y positivamente en la decisión de asignar gastos en I+D.

Palabras clave: gasto en I+D, Colombia, logit, innovación empresarial, innovación.

1. Introducción

La innovación empresarial permite que las empresas sean competitivas en los mercados. Además, dado el fenómeno de globalización en el cual se encuentran las economías nacionales, innovar resulta fundamental para la supervivencia empresarial (Canizales, 2020). Sin embargo, este proceso debe contar con recursos físicos, de capital y humanos para poder prosperar.

Adicionalmente, el proceso innovador repercute en la capacidad de generar nuevos procesos y productos en las compañías (Naranjo *et al.*, 2012). Por lo tanto, es necesario que la estructura organizativa de las firmas esté orientada hacia la generación de estas iniciativas.

En ese sentido, siguiendo a Mendoza y González (2022), el gasto en innovación y desarrollo (I+D) es una pieza fundamental en el proceso innovador, ya que propicia la generación de nuevos productos, procesos, servicios, entre otros factores. Sin embargo, este gasto involucra grandes cantidades de recursos, los cuales no están disponibles para todas las empresas. Por lo anterior, es importante determinar cuáles factores influyen en la decisión de realizar gastos en I+D por parte de las empresas. Este tema ha sido poco abordado en la literatura científica y académica.

En el caso de Colombia, para el 2021, las empresas fueron quienes más invirtieron en I+D, seguido de las instituciones de educación superior (DANE, 2024). Sin embargo, según el Banco Mundial (2024), este gasto solo representó el 0,29 % del producto interno bruto (PIB) del país.

Dado lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo determinar cuáles variables influyen en la decisión de realizar gastos en I+D para las empresas ubicadas en Colombia. Para tal asunto se utiliza la Encuesta de Empresas del Banco Mundial para el año 2023.

2. Metodología

El presente trabajo utiliza datos de corte transversal. Este tipo de datos se caracterizan porque son recolectados de diferentes individuos en un periodo de tiempo dado (Wooldrige, 2001). Las observaciones provienen de la Encuesta de Empresas del Banco Mundial, y corresponden a firmas encuestadas en Colombia para el año 2023. Inicialmente, la base de datos contenía 919 empresas. Sin embargo, al eliminar datos faltantes, omisiones de información y respuestas de no sabe/no responde, la muestra se redujo a 901.

A su vez, el tratamiento de las observaciones se realiza por medio de un modelo econométrico tipo logit. Este tipo de modelo se caracteriza porque su variable dependiente es de respuesta binaria (1 y 0) (Díaz y Llorente, 2017). A su vez, la estimación del modelo se realizó con el *software* econométrico Gretl (Cottrel y Lucchetti, 2024). Además, se analizan los efectos marginales, ya que permite observar el efecto que tienen las variables independientes en la variable dependiente (Gujarati y Porter, 2010). A continuación, en la tabla 1, se muestran las variables que fueron usadas en la investigación.

Tabla 1*Variables utilizadas en la investigación*

Dependiente		
Nombre	Definición	Opciones
Gasto en I+D (h8)	En el último año fiscal la empresa realizó gastos en Investigación y Desarrollo	Sí (1) No (0)
Independientes		
Innovación de productos (h1)	En los últimos tres años la empresa ha introducido o mejorado un producto o servicio	Sí (1) No (0)
Propiedad foránea (b2b)	Porcentaje de la propiedad que poseen individuos provenientes de otros países	$\geq 10\%$ (1) $< 10\%$ (0)
Antigüedad de la empresa (b5)	Año de inicio de operaciones de la empresa hasta la fecha de la realización de la encuesta	1-103
Experiencia del gerente (b7)	Años de experiencia del gerente general	1-70
Financiamiento (k82)	La empresa cuenta con un crédito o una línea de financiamiento	Sí (1) No (0)
Exportaciones (d3c)	La empresa realiza ventas en el extranjero	Sí (1) No (0)
Género del gerente (b7a)	El gerente general es de sexo femenino	Sí (1) No (0)

Nota: elaboración propia con datos del Banco Mundial (2023).

La tabla 1 muestra las variables utilizadas durante la investigación. Como variable dependiente se toma en consideración si la empresa en el último año fiscal ha realizado gastos en I+D. Mientras que, como variables independientes, se consideran si la firma: innova en productos, es propiedad de capital extranjero, su antigüedad, si exporta y si tiene una línea de financiamiento; además de la experiencia y el sexo del gerente general.

3. Resultados

En la presente sección, por medio de la tabla 2, se muestran los resultados de la estimación de los modelos logit.

Tabla 2*Resultados del modelo logit con variable dependiente gasto en I+D (h8)*

Variable	Modelo 1 (Logit)	Modelo 2 (Logit)	Efecto marginal
Constante	-3,03899	-2,98284	-
Propiedad extranjera (b2b)	0,105157	-	-
Antigüedad (b5)	0,0255175	0,0280031	0,31 %
Exportaciones (d3c)	0,9215	0,934896	13,75 %
Innovación de productos (h1)	0,7658	0,748880	10,3 %
Financiamiento (k82)	0,485378	0,485237**	5,4 %
Experiencia (b7)	0,0069692	-	
Género (b7a)	-0,331917	--	-
N	901		
Cuenta R ²	85,3 %	85,5 %	
* p < 0,1, ** p < 0,05, *** p < 0,01			

Nota: elaboración propia con datos obtenidos del Banco Mundial (2023).

4. Discusión

La tabla 2 muestra los resultados de las regresiones tipo logit con variable dependiente gasto en I+D (h8). En el primer modelo se observa que la antigüedad de la empresa (b5), las exportaciones (d3c) y la innovación de productos (h1) son variables significativas al 1 %; mientras que el financiamiento (k82) es significativa a nivel del 5 %.

En el segundo modelo se corren solo las variables que resultaron significativas, y el resultado es el mismo. Por último, se demuestra que aquellas firmas que exportan, innovan por productos y obtienen financiamiento aumentan su probabilidad de realizar gastos en I+D en un 13,75 %, 10,3 % y 5,4 %, respectivamente. Además, si bien la antigüedad de la empresa es una variable significativa, su efecto es casi nulo (0,31 %).

En la literatura académica y científica, y en especial para Colombia, existen pocos estudios sobre los determinantes del gasto en I+D por parte de las empresas. Sin embargo, la investigación de Juliao *et al.* (2015) utiliza un modelo de regresión lineal múltiple con el objetivo de encontrar los determinantes que propician el esfuerzo innovador y la asignación de gastos en I+D en las empresas de Colombia. Dentro de sus resultados se puede ver que aquellas empresas que son extranjeras tienen menos probabilidad de asignar recursos en I+D. Sin embargo, en el presente estudio, esta variable no resulta ser significativa.

Los resultados de la presente investigación dan cuenta de que el género no es una variable significativa al momento de asignar gastos en I+D por parte de las empresas colombianas. Sin embargo, para los países de la OCDE, organización

de la cual Colombia hace parte, Avom y Kamguia (2024) determinan que ser mujer sí influye significativa y positivamente en esta decisión. Además, estos autores también concluyen que el financiamiento y el comercio exterior son variables positivas y significativas para la asignación de gastos en I+D.

Por lo anterior, la presente investigación aporta resultados a un tema poco estudiado en Colombia: los determinantes empresariales del gasto en I+D. Sin embargo, se resalta el hecho de que se usaron datos de corte transversal, lo cual representa una limitación en la medida en que solo permite observar un fenómeno en un solo momento en el tiempo.

5. Conclusiones

Por medio de la metodología aplicada en la presente investigación se puede observar que, para Colombia, las variables relacionadas con el comercio exterior, el proceso de generación de nuevos productos y la gestión del capital son significativas al momento de la empresa decidir si realiza gastos en I+D.

Los anteriores resultados, pueden servir como base para futuras investigaciones que aborden el tema de la innovación empresarial y sus determinantes. Además, pueden ser un punto de partida para futuras investigaciones los factores internos que influyen en las empresas para determinar la asignación de recursos en I+D. Por otra parte, este trabajo puede servir como apoyo para la planeación de políticas públicas enfocadas hacia la generación de un tejido empresarial innovador en Colombia.

Por último, no se descarta que existan otras variables que aporten en la decisión de realizar gastos en I+D por parte de las empresas. Es necesario precisar que las empresas ubicadas en Colombia carecen del músculo financiero y de las capacidades técnicas y tecnológicas, tan necesarias para el fenómeno innovador y de asignación de gastos en I+D. Además, este país tiene las deficiencias que toda nación en vía de desarrollo posee: bajos niveles de productividad, escaso talento humano altamente cualificado, dependencia tecnológica, entre otros factores.

Referencias

- Avom, D. y Kamguia, B. (2024). Research and development expenditure gap: does women's political empowerment matter? *Economics of Innovation and New Technology*, 1-27. Doi: <https://doi.org/10.1080/10438599.2024.2348029>
- Banco Mundial. (2024). Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB) -Colombia. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=CO>
- Banco Mundial. (2023). Encuesta de Empresas (Colombia 2023). Recuperado de: <http://www.enterprisesurveys.org>.
- Canizales, L. (2020). Elementos clave de la innovación empresarial. Una revisión desde las tendencias contemporáneas. *Revista Innova IT-FIP*, 6(1), 50-59. Doi: <https://doi.org/10.54198/innova06.03>
- Cottrell, A. y Lucchetti, R. (2024). Gretl user's guide. Recuperado de <https://gretl.sourceforge.net/win32/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2024). Encuesta de Inversión en Investigación y Desarrollo I+D. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/encuesta-de-inversion-en-investigacion-y-desarrollo-i-d#:~:text=En%202021%2C%20la%20inversi%C3%B3n%20total,superior%20con%201%2C3%20billones.>
- Díaz, M. y Llorente, M. (2017). *Econometría*. Ediciones Pirámide.
- Gujarati, D. y Porter, D. (2010). *Econometría*. McGraw Hill.
- Juliao, J., Pineda, J. y Barrios, F. (2015). Contraste entre los determinantes de la inversión en I+D. *Revista CIFE*, 17(27), 185-208. Doi: <https://doi.org/10.15332/s0124-3551.2015.0027.05>
- Mendoza, U. y González, C. (2022). Investigación y Desarrollo: efectos en el desempeño financiero de empresas manufactureras mexicanas. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(98), 680-695. Doi: <https://doi.org/10.52080/rvg-luz.27.98.19>
- Naranjo, J., Jiménez, D. y Sanz, R. (2012). ¿Es la cultura organizativa un determinante de la innovación en la empresa? *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*, 15, 63-72. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cede.2011.07.004>
- Wooldridge, J. (2001). *Introducción a la econometría: un enfoque moderno*. Thompson Learning.

Implementación de modelo de redes neuronales convolucionales para clasificación de imágenes hiperespectrales usando transformada Wavelet

Brayan Yesid Quintero Santander

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, brayan2221707@correo.uis.edu.co

Cristhian Camilo Rey Rueda

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, cristhian2200190@correo.uis.edu.co

Juan David Toloza Parada

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, juan2221067@correo.uis.edu.co

Hoover Fabián Rueda Chacón, Ph. D.

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, hfarueda@uis.edu.co

Resumen

La clasificación de imágenes hiperespectrales (HSI) mediante redes neuronales convolucionales (CNN) es un área de gran interés en la visión por computadora. Sin embargo, los métodos utilizados para esta tarea no integran eficazmente las características espectrales y espaciales. Por esto, se propone desarrollar un modelo CNN que utilice la transformada Wavelet para extraer de manera eficiente dichas características, que clasifique imágenes HSI de manera eficiente y mejore la precisión en comparación con enfoques tradicionales como SVMs, 2D-CNNs y 3D-CNNs. Se

utilizó el *dataset* de Pavía, y se generaron parches de $12 \times 12 \times 3$ mediante análisis factorial y aumento de datos. Estos parches fueron utilizados como entrada en SpectralNET (Chakraborty y Trehan, 2021), la cual fue entrenada y evaluada. SpectralNET mostró un excelente rendimiento en las fases de entrenamiento y validación. Su capacidad para extraer tanto características espectrales como espaciales le permite destacar en la clasificación de imágenes HSI. SpectralNET mejora la precisión de clasificación y reduce la carga computacional en comparación con otros métodos. La combinación de transformadas Wavelet y 2D CNN demuestra ser una solución efi-

caz y de buen rendimiento para la clasificación de imágenes hiperespectrales.

Palabras clave: imágenes hiperespectrales, clasificación espectral, redes neuronales convolucionales, transformada Wavelet.

1. Introducción

Las imágenes hiperespectrales (HSI, por sus siglas en inglés) capturan información de una porción del espacio en múltiples bandas del espectro electromagnético, a diferencia de las imágenes RGB convencionales que solo utilizan tres bandas. Esto permite revelar características de los materiales que no son perceptibles al ojo humano. Del fenómeno descrito anteriormente surge el concepto de “firma espectral”, representativa para cada material, y que se obtiene al analizar cómo dicho material refleja o absorbe la luz; también conocida como reflectancia (Amigo, 2020).

La clasificación de imágenes hiperespectrales es crucial en una amplia variedad de campos, como la agricultura, la geología y la vigilancia ambiental. Permite identificar con precisión tipos de cultivos, determinar el estado de salud de las plantas, detectar contaminantes en cuerpos de agua o incluso identificar minerales y componentes del suelo.

Sin embargo, el procesamiento de este tipo de datos presenta desafíos significativos debido a la alta dimensionalidad y la complejidad de las firmas espectrales, lo que exige el desarrollo de métodos avanzados de análisis.

Este artículo presenta el proceso de implementación de un modelo de redes neuronales convolucionales (CNN) que utiliza la transformada Wavelet para extraer de manera eficiente la información

contenida en un cubo espectral. La aplicación de estas técnicas avanzadas optimizó el procesamiento de las imágenes, y permitió al modelo identificar con alta precisión diversos objetos o superficies, como casas y cuerpos de agua, y de esta manera realizar una clasificación detallada de las características presentes en la imagen.

2. Metodología

2.1 Descripción del modelo

Las redes neuronales convolucionales (CNN) 2D se emplean comúnmente para procesar imágenes, ya que están diseñadas para trabajar sobre datos en dos dimensiones. Se denominan “bidimensionales” porque su núcleo o *kernel* se desplaza a lo largo de las dos dimensiones espaciales de la imagen, y extrae de manera eficiente las características espaciales clave (Zheng *et al.*, 2020).

Esta capacidad de capturar patrones y relaciones espaciales en los datos es una de las principales ventajas de las CNNs, por lo que supera a otros tipos de redes que no están optimizadas para este tipo de tareas (Ge *et al.*, 2020). Una CNN básica puede representarse matemáticamente como la suma ponderada de vecinos más próximos con un sesgo constante añadido.

Dado un vector de entrada con X_i con las etiquetas correspondientes del espacio R^n , en la ecuación 1 se representa cada etiqueta Y_i como el producto de cada muestra X_i con el peso W_j definido por el kernel de tamaño N_i (i vecinos).

$$Y_i = \sum_{j \in N_i} W_j X_j \quad (1)$$

La ecuación 1 puede ser considerada como la convolución de X y el *kernel* W , que puede re-

escribirse como $Y=X*W$, esto se llama capa de convolución. La salida de las capas de convolución suele ser grande y necesita ser agrupada antes de alimentarla en las siguientes capas. Las capas de agrupación (del inglés *Pooling Layer*) se colocan entre capas de convolución para realizar una operación de filtrado y reducir el número de salidas.

2.2 Conjunto de datos hiperespectrales utilizados

El experimento fue realizado utilizando el *dataset* de la ciudad de Pavía (Graña, Veganzons y Ayerdi, 2021), un conjunto de datos ampliamente utilizado en el procesamiento de imágenes hiperespectrales. Este *dataset* consta de un cubo espectral con 1.096 filas, 715 columnas y 102 bandas espectrales, y cubre un rango de longitud de onda de 430 a 860 nm, lo que lo convierte en una fuente de datos rica y variada para la clasificación espectral.

El entorno de trabajo seleccionado para llevar a cabo el entrenamiento fue Google Colab, aprovechando su ejecución gratuita en la GPU T4, que permitió reducir significativamente el tiempo de procesamiento y entrenamiento del modelo. Esta elección fue clave para acelerar los experimentos, dado que las tareas de clasificación en imágenes hiperespectrales pueden ser computacionalmente intensivas.

2.3 Parámetros de entrenamiento de la red

Con base en estudios previos y en la literatura científica relevante, se decidió configurar el optimizador de descenso de gradiente estocástico (SGD, por sus siglas en inglés) con una tasa de

aprendizaje de 0,01 y un momentum de 0,9. Estas configuraciones fueron seleccionadas porque ofrecieron un buen equilibrio entre la velocidad de convergencia y la estabilidad durante el entrenamiento, evitando tanto la convergencia prematura como la oscilación excesiva del gradiente. La combinación de estos parámetros se ha demostrado eficaz para optimizar la minimización del error durante el proceso de ajuste de los pesos del modelo.

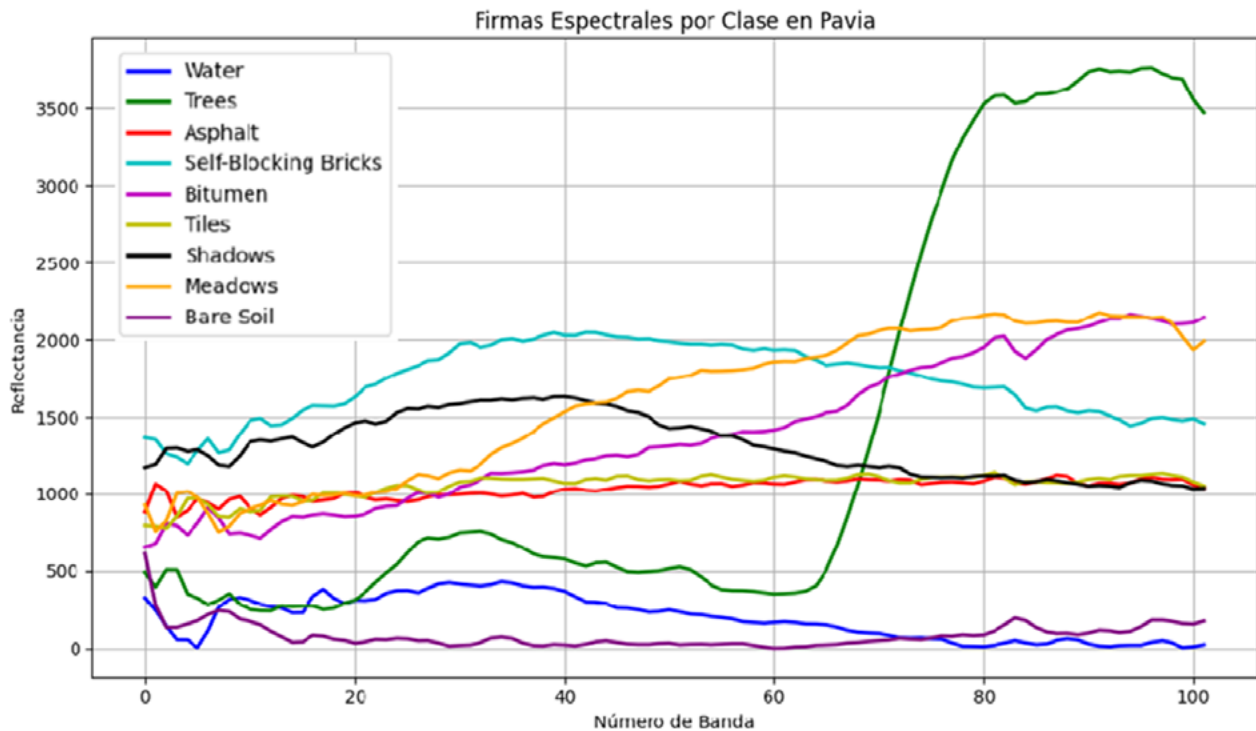
Para mejorar la eficiencia del entrenamiento y reducir el tiempo de procesamiento, se optó por extraer parches con dimensiones de 12×12 píxeles y un número reducido de 3 bandas espectrales por parche. Esta reducción en la cantidad de bandas fue motivada por la necesidad de disminuir la complejidad computacional, sin comprometer significativamente la información espectral útil para la clasificación. Esta estrategia ha sido empleada en varios estudios para encontrar un equilibrio entre la dimensionalidad de los datos y el rendimiento del modelo.

El modelo fue entrenado durante un total de 10 épocas, un número que se estimó suficiente para lograr una convergencia del modelo sin llegar a un sobreajuste. Cada época representó un ciclo completo de entrenamiento, donde el modelo ajustó sus parámetros para minimizar la función de pérdida en el conjunto de entrenamiento.

En la figura 1 se observan las firmas espectrales de cada una de las clases de nuestro conjunto de datos, que contaba con 9 clases etiquetadas.

Figura 1

Firmas espectrales correspondientes a las 9 clases etiquetadas en el dataset



Nota: en la imagen, se muestran las firmas espectrales asociadas a cada clase, lo que permite visualizar las diferencias y patrones característicos en las distintas categorías del conjunto de datos. Fuente: Elaborada por autores.

2.4 Preprocesamiento de los datos

El cubo hiperespectral que utilizamos como entrada a nuestro modelo tenía inicialmente dimensiones de $1096 \times 715 \times 10$. Tras completar el paso de análisis factorial, se extrajeron parches 3D superpuestos de dimensiones $12 \times 12 \times 3$ del cubo hiperespectral preprocesado. El tamaño de los parches de 12×12 se determinó mediante experimentación, con el fin de optimizar la precisión global del modelo.

Posteriormente, los parches fueron sometidos a un proceso de aumento de datos, en el que se aplican rotaciones, incrementando el número de

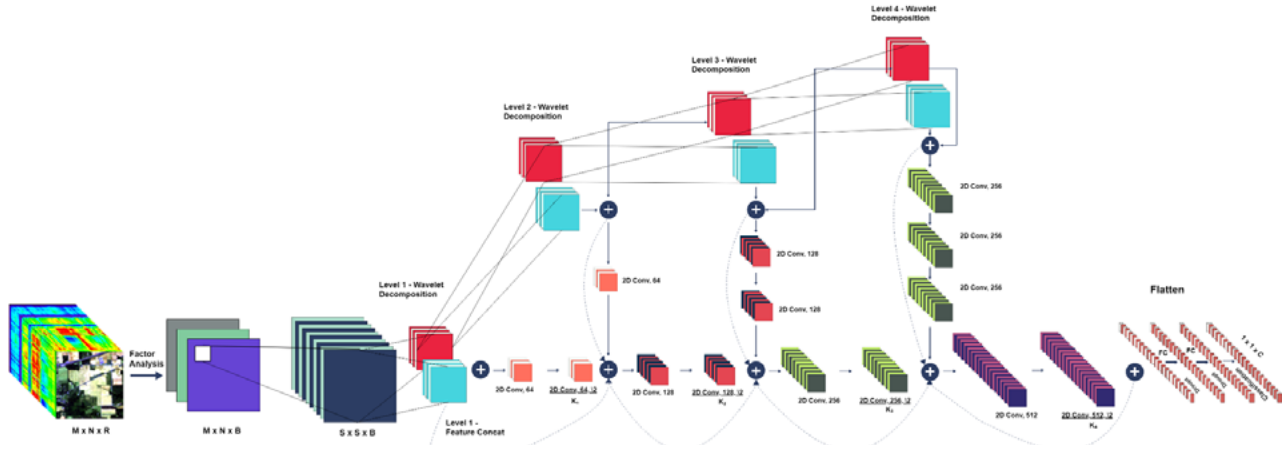
muestras de entrada en un 40 %. El conjunto de datos resultante, tras el análisis factorial y el aumento de datos, fue utilizado como entrada en nuestro modelo *SpectralNET*. En la figura 2 se observa detalladamente la arquitectura del modelo implementado.

2.5 Fundamentos transformada Wavelet

El uso de la transformada Wavelet abre el camino hacia las CNN de múltiples resoluciones, donde la convolución es realizada por un par de *kernels* K_{low} y K_{high} , los cuales generan X_{low} y X_{high} .

Figura 2

Arquitectura del modelo implementado



Nota: el cubo de HSI de entrada se preprocesa mediante Análisis Factorial (FA) para reducir su dimensión a 3 componentes (factores). Posteriormente, se extraen parches de la imagen y se someten a un proceso de aumento de datos, que luego se utilizan como entrada al modelo SpectralNET. Este modelo aplica una descomposición Wavelet en 4 niveles. Utiliza kernels de 3×3 con padding de 1×1 y stride de 2 para reducir el mapa de características, agregando las características transformadas por canal. Para mitigar el desvanecimiento del gradiente, se emplean atajos mediante convoluciones 1×1 . Finalmente, se aplica un pooling global antes de enviar la salida a las capas completamente conectadas con dropout. Fuente: Tomada de Chakraborty y Trehan (2021).

La CNN de múltiples resoluciones realiza una descomposición jerárquica de en con *kernels* diferentes en cada paso t (Cheng et al., 2023). En *SpectralNet*, el *kernel* se basa en las ondas Haar (del inglés *Haar Wavelet*), mientras que corresponde a una función de escalado. Las ondas Haar en 2D utilizan cuatro *kernels* específicos: , , , , que se emplean para llevar a cabo la transformada Wavelet (Fujieda, Takayama y Hachisuka, 2018). Estos kernels se describen por la ecuación (2) como:

$$\begin{aligned} f_{L,L} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} f_{L,H} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ f_{H,L} &= \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} f_{H,H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

En un parche de la imagen hiperespectral al aplicarle la transformada de Haar, el valor de la posición espectral (i,j) puede expresarse mediante la ecuación (3) como:

$$\begin{aligned} Haar(i,j) &= x(2i - 1, 2j - 1) \\ &+ x(2i - 1, 2j) \\ &+ x(2i, 2j - 1) + x(2i, 2j) \end{aligned} \quad (3)$$

El parche de la HSI es tomado como entrada y descompuesto por la transformada Wavelet en subbandas, después estas subbandas son enviadas a una capa de convolución para que el modelo aprenda de las características espectrales y su localización. Posteriormente, una parte de la subbanda es descompuesta nuevamente en la si-

guiente capa mediante la transformada Wavelet, que posteriormente se envía a la capa de convolución.

Este proceso de descomposición se repite en cada capa, lo que permite que la red neuronal convolucional aprenda progresivamente las características espectrales y espaciales del parche hiperespectral. De esta manera, la CNN aprovecha tanto la información espacial como la espectral para una mejor representación y clasificación de los datos.

3. Resultados

El rendimiento del modelo se presenta en la figura 4, donde se muestran las gráficas del comportamiento del *accuracy* y la función de pérdida (del inglés *loss function*), a lo largo de las diferentes épocas.

Las métricas resultantes pueden observarse en la figura 3, las cuales ofrecen una evaluación precisa del desempeño del modelo tanto durante la fase de entrenamiento como en la etapa de prueba con los datos de validación; las fórmulas que se usan en cada de las 3 métricas se pueden observar a continuación.

	POSITIVE	NEGATIVE
POSITIVE	TP	FN
NEGATIVE	FP	TN

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= \frac{TP}{TP + FP} & \text{Recall} &= \frac{TP}{TP + FN} \\ \text{Accuracy} &= \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \\ \text{F1 Score} &= 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \end{aligned} \quad (4)$$

Figura 3

Métricas que se tomaron en cuenta para la evaluación del modelo: precisión, recall y F1-score, desglosadas por cada clase

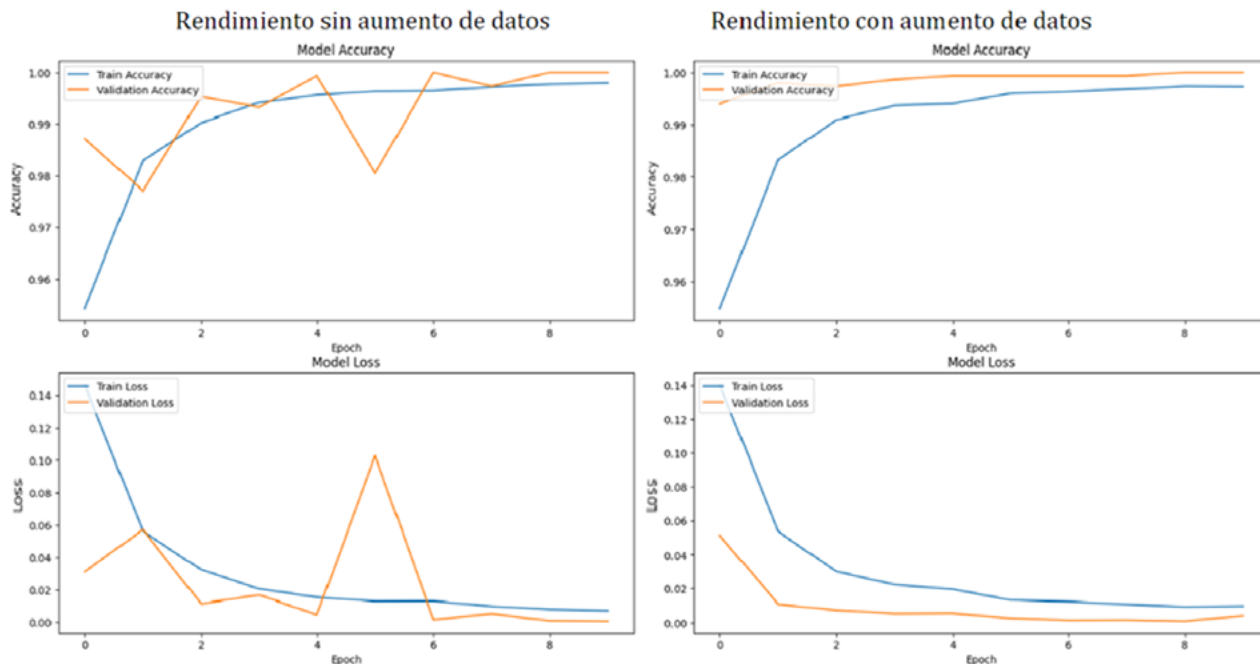
	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	660
1	1.00	1.00	1.00	76
2	1.00	1.00	1.00	31
3	1.00	1.00	1.00	27
4	1.00	1.00	1.00	66
5	1.00	1.00	1.00	92
6	1.00	1.00	1.00	73
7	1.00	1.00	1.00	428
8	1.00	1.00	1.00	29
accuracy			1.00	1482
macro avg	1.00	1.00	1.00	1482
weighted avg	1.00	1.00	1.00	1482

La partición de los datos se realizó dividiendo el conjunto de píxeles de la imagen hiperespectral en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para prueba, lo cual garantiza un adecuado balance entre la cantidad de datos usados para ajustar los parámetros del modelo y un conjunto suficientemente representativo para evaluar su capacidad de generalización.

Tal como se observa en la figura 4, el modelo alcanzó un rendimiento notable, que logra altos niveles de *accuracy* tanto en el entrenamiento como en la validación. Las curvas de *accuracy* y *loss* revelan una mejora progresiva a lo largo de las épocas, lo que sugiere que el modelo está convergiendo de manera efectiva hacia una solución óptima.

Figura 4

Gráficas de rendimiento del modelo



Nota: en la parte izquierda se presenta el comportamiento del modelo en términos de precisión (accuracy) y pérdida (loss) utilizando parches de entrada de dimensiones $12 \times 12 \times 3$. En la parte derecha se muestra el rendimiento después del aumento de datos. Este enfoque permitió optimizar tanto la precisión como la reducción de la pérdida.

Además, la implementación de técnicas de aumento de datos (*data augmentation*) contribuyó significativamente a mejorar el rendimiento del modelo, reflejando una mejor generalización y una reducción del riesgo de sobreajuste (*overfitting*).

La mejora en el rendimiento es evidente en la mayor estabilidad observada en las gráficas, donde se aprecia una disminución más rápida de la pérdida y un aumento más consistente del *accuracy* a lo largo de las épocas. Esto indica que el modelo no solo logra adaptarse correctamente a los datos de entrenamiento, sino que también mantiene un desempeño robusto y confiable cuando se enfrenta a datos no vistos previamente.

Estas observaciones resaltan la importancia de técnicas como el *data augmentation* para promover un entrenamiento más eficaz y equilibrado, y evitan que el modelo se ajuste demasiado a los datos específicos del conjunto de entrenamiento, y favorecen una generalización más sólida en diferentes escenarios de testeo.

En la figura 5 se muestra una comparación visual entre los resultados de predicción obtenidos por el modelo y el *ground truth*. En el panel izquierdo, se presenta una imagen pseudo-RGB generada a partir de tres bandas espectrales seleccionadas del cubo hiperespectral. En el panel central, se encuentra la referencia del *ground truth*, mientras que el panel derecho muestra las predicciones del modelo. A través del uso de colores, se des-

tacan las áreas correctamente clasificadas, y se identifican las pocas diferencias existentes entre el *ground truth* y las predicciones. Esta figura facilita la visualización clara de las regiones correctamente identificadas por el modelo, y permite evaluar su precisión en la clasificación espectral.

4. Discusión

Además de la implementación del modelo SpectralNet, se logró un manejo apropiado para los datos que permitió modificar y mejorar el preprocesamiento, lo que ayudó a reducir el riesgo de sobreajuste, especialmente considerando la cantidad limitada de parámetros en el conjunto de datos utilizado.

También se aplicaron predicciones por lotes (del inglés *batch predictions*) para optimizar el rendimiento y aligerar la carga computacional durante el proceso de predicción. Una de nuestras princi-

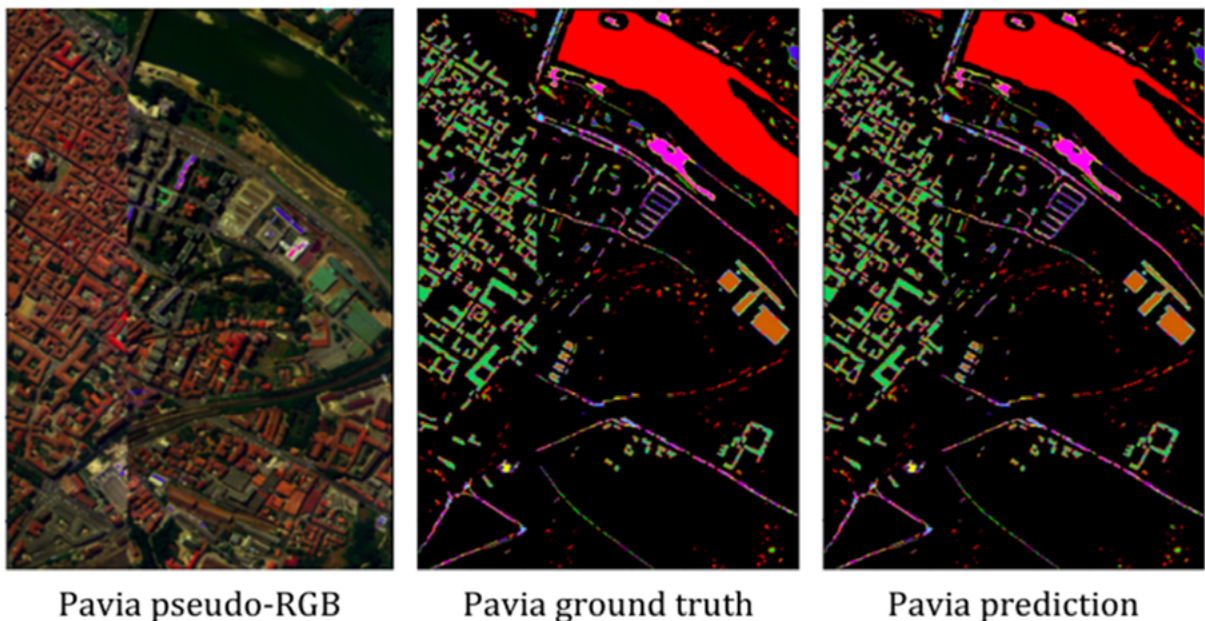
pales limitaciones fue el tamaño del conjunto de datos, que acota el análisis a un número limitado de parámetros. Durante la implementación nos enfrentamos a un desafío relacionado con el tamaño de los parches.

Optamos por el método de prueba y error para determinar el tamaño óptimo, ya que:

- Cuando seleccionamos parches más pequeños, experimentamos problemas de memoria en Google Colab notebooks, impidiendo así continuar con el entrenamiento del modelo.
- En caso de seleccionar un tamaño de parche mayor al utilizado, el modelo se veía limitado debido a la reducción en la cantidad de datos de entrada, lo que aumentaba el riesgo de sobreajuste.

Figura 5

Comparación visual entre los resultados de predicción obtenidos por el modelo y el ground truth



5. Conclusiones

En este artículo se presentó una implementación efectiva de la arquitectura *SpectralNet* para la clasificación de imágenes hiperespectrales. Los resultados demuestran que la combinación de estas técnicas de preprocesamiento mejora significativamente el rendimiento del modelo, logrando adaptarse eficientemente al conjunto de datos hiperespectrales.

Las métricas obtenidas, particularmente en términos de precisión y capacidad predictiva, son notablemente altas y corresponden fielmente a las etiquetas proporcionadas en el *dataset*. Estos hallazgos sugieren que *SpectralNet* es una arquitectura prometedora para tareas de clasificación de imágenes hiperespectrales. Futuras líneas de investigación podrían explorar la aplicación de este enfoque a otros conjuntos de datos y tareas de aprendizaje automático.

Referencias

- Amigo, J. M. (2020). Hyperspectral and multispectral imaging: setting the scene. En J. M. Amigo (Ed.), *Hyperspectral Imaging* (pp. 3-16). Países Bajos: Elsevier
- Chakraborty, T., & Trehan, U. (2021). Spectral-NET: Exploring Spatial-Spectral WaveletCNN for Hyperspectral Image Classification. *arXiv*, 2104.00341v1, 1-7. Recuperado en 10 de septiembre de 2024, de <https://arxiv.org/abs/2104.00341>
- Cheng, M.-M., Jiang, P.-T., Han, L.-H., Wang, L., & Torr, P. (2023). Deeply explain CNN via hierarchical decomposition. *International Journal of Computer Vision*. Recuperado de https://mftp.mmcheng.net/Papers/23IJCV_CNNas-DT.pdf
- Fujieda, S., Takayama, K., & Hachisuka, T. (2018). Wavelet convolutional neural networks. *arXiv preprint*, arXiv:1805.08620
- Ge, Z., Cao, G., Li, X., & Fu, P. (2020). Hyperspectral image classification method based on 2D-3D CNN and multibranch feature fusion. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5776-5788.
- Graña, M., Veganzons, M. A., & Ayerdi, B. Hyperspectral Remote Sensing Scenes. Universidad del País Vasco. https://www.ehu.es/ccwintco/index.php/Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes#Pavia_Centre_scene
- J. Zheng, Y. Feng, C. Bai, and J. Zhang. (2020). Hyperspectral image classification using mixed convolutions and covariance pooling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (pp. 1-13).

Exploración de los fundamentos de la reconstrucción 3D con structure from motion: implementación y pruebas con monumentos de la UIS

Paula Uzcátegui León

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, paula2211475@correo.uis.edu.co

Andrea Juliana Parra Ariza

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, andrea2210062@correo.uis.edu.co

Jorge Andrey García Vanegas

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, jorge2180115@correo.uis.edu.co

Ramiro Santiago Ávila Chacón

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, ramiro2191920@correo.uis.edu.co

Hoover Fabián Rueda Chacón, Ph. D.

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, hfarueda@uis.edu.co

Resumen

Structure from motion (SfM) es una técnica fotogramétrica utilizada para la reconstrucción 3D, que estima la estructura tridimensional de una escena a partir de múltiples imágenes bidimensionales. Este artículo implementa los principios de SfM para reconstruir digitalmente estatuas y monumentos en la Universidad Industrial de Santander (UIS). Las imágenes RGB se capturan en diversas locaciones de la UIS y luego se procesan siguiendo un pipeline de SfM que incluye la calibración de la cámara, procesamiento y emparejamiento de puntos clave, estimación de las

poses de la cámara, triangulación en 3D y ajuste de paquete. Los resultados muestran nubes de puntos que representan las reconstrucciones 3D de las estatuas, así como su postprocesamiento en blender. Cada etapa del pipeline de SfM presenta oportunidades de optimización, como lo muestran las últimas implementaciones del estado del arte.

Palabras clave: reconstrucción 3D; structure from Motion (SfM); geometría epipolar; calibración; monumentos.



1. Introducción

La reconstrucción 3D es el proceso de capturar escenas del mundo real y crear representaciones digitales tridimensionales. Existen diversas técnicas para llevar a cabo este proceso, incluidas la fotogrametría, LiDAR, luz estructurada y *structure from motion* (SfM) (Ham, Wesley y Hendra, 2019). SfM es una técnica que utiliza una serie de imágenes bidimensionales de una escena para reconstruir su estructura tridimensional. A diferencia de otras técnicas, una sola imagen carece de la información necesaria para una reconstrucción 3D, ya que al capturar una escena se proyecta desde tres dimensiones a dos, por lo que pierde la información de profundidad (Aharchi y Ait Kbir, 2020).

La ventaja de SfM, que se basa en los principios de la fotogrametría, es que no requiere conocer de antemano las diferentes posiciones de la cámara, lo que la convierte en una opción económica y eficiente, sin necesidad de equipos especializados. Esta técnica ha sido aplicada en diversos campos, incluida la reconstrucción de superficies corporales para el monitoreo de pacientes (Abreu de Souza *et al.*, 2023), el análisis de estructuras forestales en monitoreo remoto (Frey *et al.*, 2018) y la reconstrucción de estructuras históricas, como en el proyecto “Building Rome in a Day” (Agarwal *et al.*, 2011).

Aunque los principios básicos de SfM están bien establecidos, cada etapa del proceso ofrece oportunidades para la optimización, especialmente mediante el uso de nuevas tecnologías como el aprendizaje profundo (*deep learning*). En este trabajo, presentamos una implementación de los principios fundamentales de SfM, con el objetivo de comprender en profundidad cada fase del proceso y explorar posibles mejoras.

2. Metodología

El proceso de reconstrucción 3D mediante SfM se puede dividir en dos etapas principales: primero, la adquisición de imágenes de la escena desde múltiples ángulos y la calibración de la cámara, para asegurar la precisión geométrica; segundo, la estimación de la matriz fundamental, la reconstrucción inicial de la escena utilizando un par de imágenes y la integración progresiva de imágenes adicionales para expandir y densificar la nube de puntos 3D, mejorando la representación completa de la estructura. A esta etapa la llamaremos SfM.

2.1 Adquisición de imágenes y calibración de la cámara

La adquisición de las imágenes se realiza en el campus central de la UIS en un entorno abierto para el monumento “Lección de Geometría” y entornos cerrados para las estatuas. El sensor utilizado para la captura de las imágenes fue el de la cámara del celular iPhone XR, con características de una cámara gran angular de 12 MP, apertura de $f/1.8$, lente de seis elementos y fotos panorámicas (hasta 63 MP).

Posteriormente, se procede a la calibración de la cámara, para determinar la relación exacta entre los puntos 3D del mundo real y sus proyecciones 2D correspondientes en la imagen capturada; es necesario tomar en cuenta las posibles distorsiones o efectos visuales que aplique la lente y demás partes de la cámara a las fotos.

Matemáticamente, esta relación se representa por las ecuaciones 1 y 2 (Zhang, 2000).

$$s\tilde{m} = A[Rt]\tilde{M} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x + x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ \hat{y} &= y + y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{aligned} \quad (2)$$

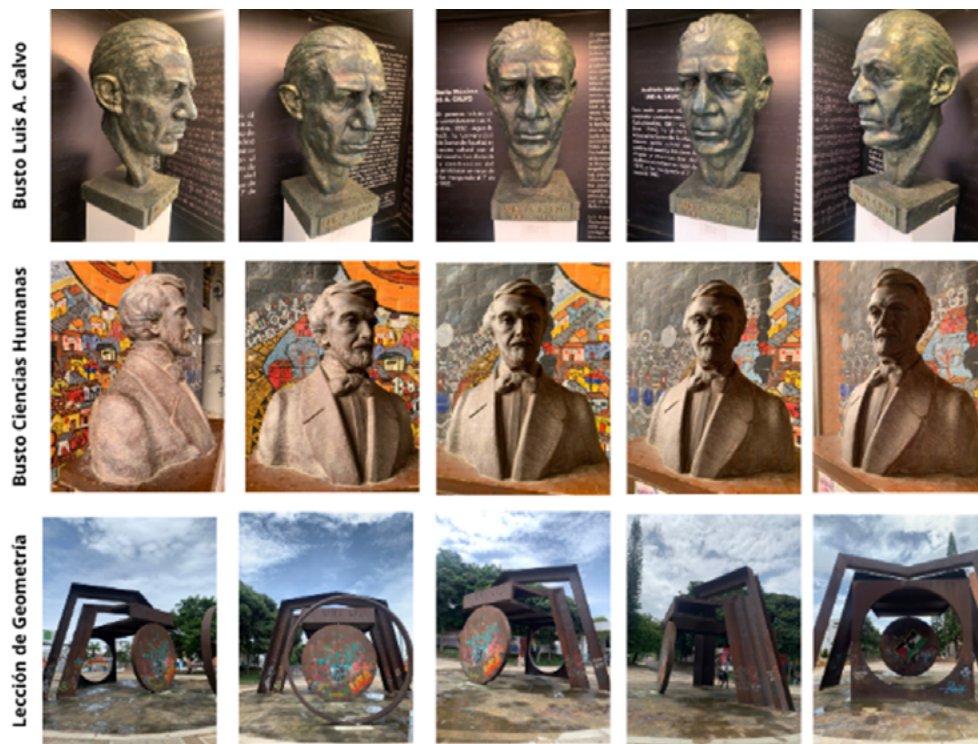
Para (1) $\tilde{m}$ es el vector $m = [u, v]$ aumentado que representa un punto 2D, $\tilde{M}$ es el vector $M = [x, y, z]$ aumentado que representa un punto 3D, un factor de escala arbitrario, (R, t) son los parámetros extrínsecos de rotación y traslación de la cámara y sus parámetros intrínsecos. En cuanto a (2) (x, y) son las coordenadas ideales de la imagen, $(\hat{x}, \hat{y})$ las distorsionadas, k_1 y k_2 los coeficientes de distorsión radial

Figura 1

Adquisición de las imágenes para las estatuas y monumento

La idea de calibrar la cámara con la que se tomaron las fotos es obtener los parámetros A (que llamaremos K) y k para corregir la proyección de los puntos.

Se empleó el algoritmo de calibración con un patrón de tablero de ajedrez, propuesto por Zhang (1998), y que continúa siendo el estándar en su campo hoy en día. Su proceso consiste en lo siguiente: imprimir y pegar el patrón en una superficie plana y tomar múltiples imágenes desde diferentes ángulos y posiciones, detectar los puntos en que interseccionan las casillas en cada imagen, estimar los parámetros intrínsecos y extrínsecos, estimar los coeficientes de distorsión radial y optimizar los parámetros minimizando el error entre los puntos reales y sus proyecciones. Se utilizaron las implementaciones de este método hechas por MATLAB y con OpenCV.



Fuente: elaborada por los autores

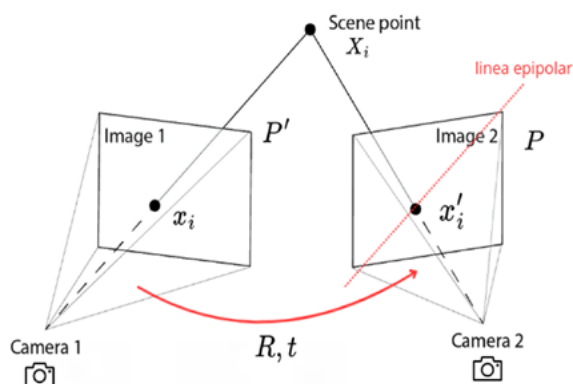
2.2 SFM

Structure from motion se basa en los mismos principios de la fotogrametría estéreo, pero se diferencia en que las posiciones de las cámaras no son conocidas de antemano. Para determinar estas posiciones, se aplican las reglas de la geometría epipolar (ver figura 2). El objetivo es calcular las matrices de proyección de las cámaras, denotadas como P y P' , las cuales están definidas por la rotación y traslación de una cámara respecto a la otra. La geometría epipolar establece la relación entre dos imágenes de la misma escena, capturadas desde diferentes puntos de vista, conforme a las ecuaciones (3) (Hartley y Zisserman, 2003).

$$\begin{aligned}x_i &= P X_i \\x'_i &= P' X_i\end{aligned}\quad (3)$$

Donde x_i y x'_i son píxeles que corresponden al mismo punto X_i en la escena real.

Figura 2
Representación de geometría epipolar



Fuente: imagen adaptada de Epipolar Geometry (Qureshi, 2020) con algunas modificaciones.

Para calcular las matrices de proyección de las cámaras, la geometría epipolar introduce el concepto de la matriz fundamental, que contiene toda la información que describe la geometría de la escena (ecuación 4).

$$x^T F x' = 0 \quad (4)$$

Una vez obtenida la matriz fundamental, se puede calcular la matriz esencial, la cual está relacionada con la matriz de los parámetros intrínsecos de la cámara, K (como se muestra en la ecuación 5). Al realizar la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz esencial (Abdi, 2007), es posible determinar las matrices de rotación y traslación de una cámara respecto a la otra.

$$K^T F K = 0 \quad (5)$$

Para encontrar la matriz fundamental F y, en última instancia, los parámetros de las cámaras, es necesario identificar puntos x_i y x'_i en las imágenes que correspondan al mismo punto en la escena, lo que se conoce como el *problema de correspondencia*. SfM cuenta con una serie de pasos bien definidos para resolver este problema, los cuales se detallan a continuación. Los algoritmos mencionados han sido implementados utilizando la biblioteca de Python OpenCV.

Extracción de características: este paso consiste en encontrar puntos clave en la imagen. Un punto clave es un punto de interés que posee propiedades únicas o distintivas, como una esquina, un borde, un cambio de textura u otro tipo de punto que sea estable y repetible bajo diferentes condiciones. Para ello, existen algoritmos como SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), ORB (*Oriented FAST and Rotated BRIEF*) y SURF

(*Speeded Up Robust Features*) (Bansal, Kumar y Kumar, 2021), los cuales buscan características distintivas en la imagen que sean estables frente a cambios de escala y rotación. En nuestra implementación, utilizamos SIFT (ver figura 3), que está implementado en la librería y es capaz de detectar miles de puntos clave, especialmente en áreas con texturas y colores variados, o en las esquinas.

Figura 3

Puntos clave (verde) obtenidos con SIFT para la estatua de Luis A. Calvo



Fuente: elaborada por autores.

Emparejamiento de puntos: una vez identificados los puntos clave en ambas imágenes, es necesario emparejar aquellos que probablemente correspondan al mismo punto de la escena. Los algoritmos de detección de puntos clave mencionados anteriormente también generan descriptores para cada punto, los cuales son vectores que ofrecen una descripción única basada en su vecindario local. El emparejamiento de puntos se

realiza buscando los descriptores más cercanos entre sí. En OpenCV, esto se puede hacer mediante un método de fuerza bruta o utilizando el algoritmo **FLANN** (*Fast Library for Approximate Nearest Neighbors*) (Muja y Lowe, 2014).

En nuestra implementación, utilizamos FLANN (ver figura 4), lo que permite reducir la cantidad de puntos clave a aquellos más útiles para la reconstrucción.

Figura 4

Emparejamiento de puntos clave de dos imágenes consecutivas de la estatua de Luis A. Calvo



Fuente: elaborada por autores.

Cálculo de la matriz fundamental: el siguiente paso consiste en computar la matriz fundamental resolviendo un sistema de ecuaciones basado en los puntos emparejados. Para ello, se utiliza el algoritmo 8Points (Hartley, 1997), el cual, como su nombre indica, requiere un mínimo de ocho puntos para calcular la matriz. Cuanto más precisos sean los emparejamientos de puntos, más exacta será la matriz fundamental resultante. En OpenCV existen versiones optimizadas del método de 8Points que emplean técnicas como **RANSAC** (*Random Sample Consensus*) (Fischler y Bolles, 1981) o **LMEDS** (*Least Median of Squa-*

res) (Rousseeuw, 1984) para eliminar los valores atípicos en los emparejamientos.

Una vez obtenida la matriz fundamental, se calcula la matriz esencial, junto con las matrices de rotación y traslación de una cámara con respecto a la otra, siguiendo las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Después de resolver el problema de correspondencia, se aborda el problema de reconstrucción para determinar la posición tridimensional de cada píxel. SfM también define pasos específicos para llevar a cabo esta tarea:

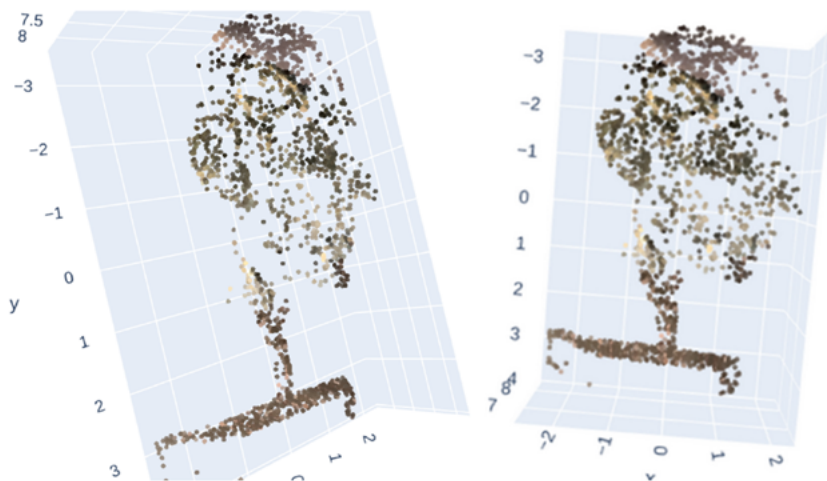
Triangulación. Una vez conocidas las posiciones de las cámaras y las correspondencias de puntos, se utiliza la triangulación para calcular las posiciones tridimensionales de los puntos en la escena. Esto se logra proyectando rayos desde cada cámara a través de los puntos correspondientes en las imágenes. La intersección de estos rayos determina la posición 3D de los puntos en la escena. Este proceso se implementó mediante

una función de OpenCV y, como se muestra en la figura 5, permite obtener una reconstrucción del perfil de la estatua con 2.281 puntos.

Agregando múltiples vistas. Para ampliar la nube de puntos obtenida mediante la triangulación de dos imágenes, es necesario determinar la posición de la siguiente imagen en relación con la escena 3D reconstruida hasta el momento. Este es un problema ampliamente estudiado en el campo de la visión por computadora. En OpenCV, se utiliza el algoritmo *Perspective-n-Point* (PnP) (Lepetit y Fua, 2006) para calcular la posición de la siguiente cámara (a partir de puntos 2D) con respecto a la triangulación de las vistas previas (puntos 3D). Una vez determinada la posición de la nueva cámara, se realiza nuevamente la triangulación con la imagen anterior, concatenando los nuevos puntos a la nube de puntos existente. Como se muestra en la figura 6, este enfoque permite obtener una reconstrucción detallada de la estatua utilizando SfM con 27 imágenes y 72.563 puntos, como se puede observar en la tabla I.

Figura 5

Nube de puntos inicial obtenida a partir de dos imágenes



Nota: a la izquierda se muestra una vista frontal de la nube de puntos, mientras que a la derecha se presenta una vista rotada hacia la izquierda.

Fuente: elaborada por autores.

Además, cada vez que se realiza una triangulación, se aplica un proceso de optimización conocido como *Bundle Adjustment*. Este proceso busca minimizar el error de reproyección entre la nube de puntos tridimensional obtenida y las imágenes bidimensionales originales de las que se derivó.

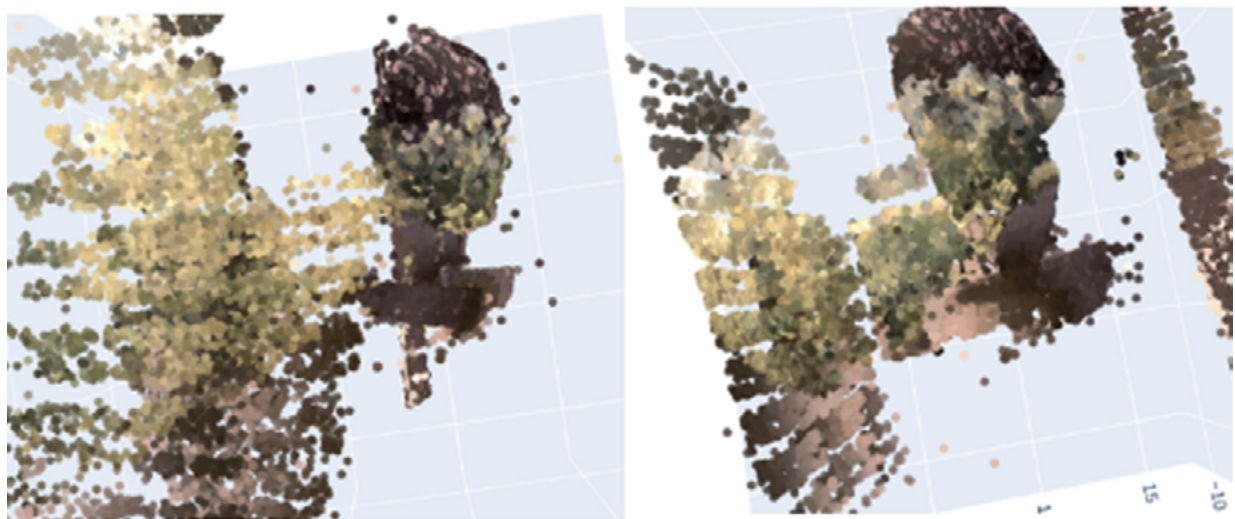
3. Resultados

Se lograron implementar de manera efectiva los principios fundamentales de *structure from motion* (SfM) utilizando Python, replicando exitosamente cada etapa del pipeline, desde la calibración de la cámara hasta la generación de nubes de puntos tridimensionales. Esta implementación no requirió el uso de equipos especializados ni posiciones de cámara previamente conocidas, por lo que se consigue un resultado económico, flexible y fácil de recrear. En los bustos de ciencias humanas y del Luis A. Calvo, los resultados fueron especial-

mente satisfactorios, se obtuvieron reconstrucciones lo suficientemente buenas para distinguir las a simple vista; en cambio, en la lección a la geometría, se obtuvieron muy pocos puntos, y no hubo un buen resultado. En cuanto la obtención de los modelos 3D, se hizo uso de blender y su sistema para modificar la geometría de un objeto: *Geometry Nodes*, más específicamente con los nodos puntos a volumen y volumen a malla. Luego de definir un radio para el volumen que ocupa cada punto en la nube y establecer la cantidad de voxels (equivalente tridimensional de un píxel) que rellenarán determinado volumen, este se transforma en una superficie o malla según un umbral de densidad; entre más bajo el umbral, se cubrirán las áreas menos densas. Las estructuras resultantes se muestran en la figura 7; la primera hecha con un total de 410.800 voxels, un radio de 02 metros y un umbral del 0,1, y su siguiente con 157.000 voxels, un radio de 0,1 metros y un umbral de 1.

Figura 6

Reconstrucción de la estatua de Luis A. Calvo con múltiples vistas



Fuente: Elaborada por autores.

Tabla 1

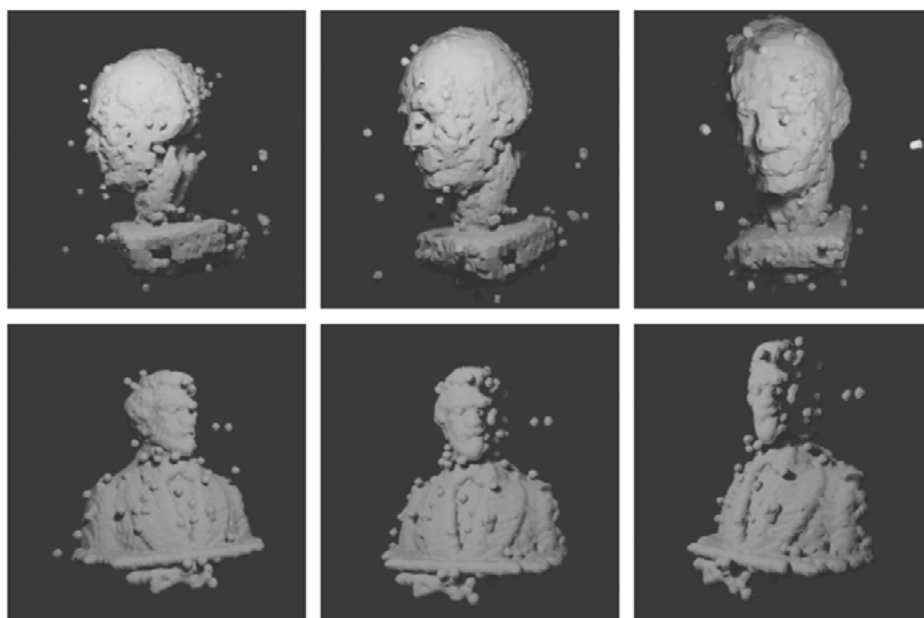
Número de puntos obtenidos por el número de imágenes para los monumentos probados

Estatuas	Imágenes	Puntos obtenidos
Luis. A Calvo	27	72.563
C. Humanas	16	162.306
Lección de geometría	19	3.244

Fuente: Elaborada por los autores

Figura 7

Renderizado de la nube de puntos en Blender



Fuente: elaborada por autores.

4. Discusión

Nuestro método logró reconstrucciones precisas en imágenes con buena visibilidad y múltiples texturas distintivas, pero enfrentó desafíos debido a sombras y texturas repetitivas, lo que causó emparejamientos incorrectos en algunos casos. Aunque utilizamos algoritmos tradicionales y SfM en Python, se sugiere que métodos modernos, como el de Sarlin *et al.* (2019), mejorarían el emparejamiento en condiciones difíciles. La calibración previa de la cámara permitió geometrías más

precisas, acercándonos al modelo euclidiano, en comparación con trabajos anteriores como el de Beardsley, Torr, y Zisserman (1996). Para optimizar tiempos, nos enfocamos en reconstrucciones parciales, mejorando la eficiencia a costa de algunos detalles.

Es importante destacar que los parámetros como el número de vóxeles y el radio por punto utilizados durante el renderizado en Blender variaron considerablemente entre las diferentes estructuras. En el caso de los bustos, la nube de puntos

generada fue lo suficientemente densa y precisa como para permitir un buen proceso de renderizado. Sin embargo, en el monumento “Lección de Geometría”, la calidad de los puntos obtenidos fue más baja, lo que afectó negativamente la reconstrucción final.

5. Conclusiones

En este artículo, se utiliza la técnica de *structure from motion* (SfM) para realizar reconstrucciones 3D de diferentes monumentos en la Universidad Industrial de Santander (UIS), a partir de imágenes bidimensionales RGB. Los principios básicos de SfM, utilizando algoritmos tradicionales, han demostrado ser eficientes, exhaustivos y con tiempos de procesamiento reducidos. Sin embargo, cada etapa del proceso presenta oportunidades de optimización, desde la identificación y emparejamiento de puntos clave hasta el postprocesamiento de la nube de puntos, como se evidencia en mejoras implementadas en el estado del arte. Finalmente, UISFM se pone a disposición del público como una herramienta de código abierto para facilitar la realización de reconstrucciones 3D por otros usuarios.

Agradecimientos

Agradecemos al Semillero de Investigación Hands-On Computer Vision por su valiosa dirección y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Abdi, H. (2007). Singular value decomposition (svd) and generalized singular value decomposition. Encyclopedia of measurement and statistics, 907(912), 44. Descargado de https://www.cimat.mx/~alram/met_num/clases/Abdi-SVD2007-pretty.pdf
- Abreu de Souza, M., Alka Cordeiro, D. C., Oliveira, J. d., Oliveira, M. F. A. d., y Bonafini, B. L. (2023). 3d multi-modality medical imaging: Combining anatomical and infrared thermal images for 3d reconstruction. *Sensors*, 23(3). Descargado de <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/3/1610> doi: 10.3390/s23031610
- Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, N., Simon, I., Curless, B., Seitz, S. M., y Szeliski, R. (2011, oct). Building rome in a day. *Commun. ACM*, 54(10), 105–112. Descargado de <https://doi.org/10.1145/2001269.2001293> doi:10.1145/2001269.2001293
- Aharchi, M., y Ait Kbir, M. (2020). A review on 3d reconstruction techniques from 2d images. En M. Ben Ahmed, A. A. Boudhir, D. Santos, M. El Aroussi, y I. R. Karas (Eds.), *Innovations in smart cities applications edition 3* (pp. 510–522). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-37629-1_37
- Bansal, M., Kumar, M., y Kumar, M. (2021). 2d object recognition: A comparative analysis of sift, surf and orb feature descriptors. *Multimedia Tools and Applications*, 80, 18839–18857. doi: 10.1007/s11042-021-10646-0
- Beardsley, P., Torr, P., y Zisserman, A. (1996, 01). 3d model acquisition from extended image sequences. En *Computer vision — eccv '96* (Vol. 1065, pp. 683–695). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-61123-1_181
- Fischler, M. A., y Bolles, R. C. (1981, jun). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis

- and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6), 381–395. doi: 10.1145/358669.358692
- Frey, J., Kovach, K., Stemmler, S., y Koch, B. (2018). Uav photogrammetry of forests as a vulnerable process. a sensitivity analysis for a structure from motion rgb-image pipeline. *Remote Sensing*, 10(6). Descargado de <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/912> doi: 10.3390/rs10060912
- Ham, H., Wesley, J., y Hendra, H. (2019). Computer vision based 3d reconstruction: A review. *International journal of electrical and computer engineering (Malacca, Malacca)*, 9(4), 2394-. doi: 10.11591/ijece.v9i4.pp2394-2402
- Hartley, R. (1997, junio). In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(6), 580–593. doi: 10.1109/34.601246
- Hartley, R., y Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision* (2nd ed. ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/cbo9780511811685
- Lepetit, V., y Fua, P. (2006, septiembre). Keypoint recognition using randomized trees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(9), 1465–1479. doi: 10.1109/tpami.2006.188
- Muja, M., y Lowe, D. G. (2014, noviembre). Scalable nearest neighbor algorithms for high dimensional data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 36(11), 2227–2240. doi: 10.1109/tpami.2014.2321376
- Qureshi, F. (2020). Epipolar geometry. Ontario Tech University. Descargado 2024-09-09, de <https://csundergrad.science.uoit.ca/courses/cv-notes/notebooks/21-epipolar-geometry.html>
- Rousseeuw, P. J. (1984, diciembre). Least median of squares regression. *Journal of the American Statistical Association*, 79(388), 871–880. doi: 10.1080/01621459.1984.10477105
- Sarlin, P.-E., DeTone, D., Malisiewicz, T., y Rabinovich, A. (2019). Superglue: Learning feature matching with graph neural networks. *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.1911.11763
- Zhang, Z. (1998). Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review. *International Journal of Computer Vision*, 27(2), 161–195. doi: 10.1023/a:1007941100561
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334. doi: 10.1109/34.888718

DetECCIÓN de anomalías relacionadas con el cáncer de mama utilizando modelos de aprendizaje profundo e imágenes térmicas

Guillermo Pinto Ruiz

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, guillermo2210069@correo.uis.edu.co

Miguel Fernando Pimiento Escobar

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, miguel2210054@correo.uis.edu.co

Cristián Díaz Franco

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, cristian2211251@correo.uis.edu.co

Hoover Fabián Rueda Chacón, Ph. D.

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia, hfarueda@uis.edu.co

Resumen

Se busca desarrollar un enfoque de visión por computadora para la detección de anomalías relacionadas con el cáncer de mama, usando transformadores de visión y redes neuronales convolucionales en imágenes térmicas. Utilizamos el conjunto de datos *Database for Research Mastology with Infrared Image* para entrenar y evaluar modelos preentrenados como *Vision Transformers (ViT)*, *ResNet* y *Xception*. Implementamos validación cruzada y técnicas de atención visual, como *GradCAM*, para mejorar la explicabilidad. Los modelos *ViT_B_16* y *ResNet152* lograron una exactitud del 95,30 % y 95,19 %, respectivamente. La validación cruzada fortalece nuestros

resultados en comparación con estudios previos que no aplicaron esta metodología. *GradCAM* reveló que las predicciones se basaron en regiones relevantes de las imágenes. Los resultados subrayan el potencial de los modelos de aprendizaje profundo y las termografías, por lo que abre oportunidades para aplicaciones clínicas en la detección temprana del cáncer de mama. El código está disponible en <https://github.com/guillepinto/Fine-Tuned-Thermal-Breast-Cancer-Diagnosis>.

Palabras clave: cáncer de mama, redes neuronales convolucionales, transformador de visión, termografía mamaria, transferencia de aprendizaje.



1. Introducción

El cáncer de mama (CM) es el cáncer más comúnmente diagnosticado en mujeres a nivel mundial; representa más del 23 % de los casos registrados (Giaquinto *et al.*, 2022). En 2022, más de 666.000 mujeres murieron por CM, con una incidencia creciente (Grigorean y Cristian, 2022), especialmente en economías emergentes, donde la mortalidad supera a la de países desarrollados (Bray *et al.*, 2024).

En Colombia, la tasa de mortalidad estandarizada por edad (ASR), por cada 100.000 mujeres, ha aumentado de 8,4 en 2008 a 9,6 en 2020 (IARC¹). El diagnóstico temprano es crucial para la supervivencia: la tasa a 5 años es del 99 % en casos localizados², pero cae al 30 % cuando la enfermedad es distante (Giaquinto *et al.*, 2022). Aunque puede detectarse en autoexámenes, a menudo la masa es demasiado pequeña para percibirse al tacto. Por ello, se recomiendan estudios médicos, aunque estos enfrentan limitaciones como el acceso complicado o el alto costo (Bray *et al.*, 2024).

Las técnicas de imagenología como la mamografía, el ultrasonido y la resonancia magnética son actualmente las principales herramientas para la detección temprana de CM, aunque presentan limitaciones importantes. La mamografía expone a radiación, tiene un costo elevado y baja especificidad en mujeres con tejido mamario denso (Giaquinto *et al.*, 2022).

El ultrasonido ofrece imágenes menos detalladas, no siempre cubre toda la mama y depende de la experiencia del operador, mientras que la reso-

nancia magnética, aunque efectiva, está limitada en pacientes con implantes metálicos y puede provocar claustrofobia debido a la duración y la necesidad de inmovilidad prolongada del procedimiento (Din *et al.*, 2022). A pesar de estas modalidades, la biopsia sigue siendo el único método definitivo para confirmar CM (Figueiredo *et al.*, 2019). Sin embargo, el análisis de imágenes histopatológicas es difícil, requiere tiempo y está sujeto a la experiencia del especialista, lo que puede derivar en diagnósticos inexactos (Zhang *et al.*, 2019).

Las imágenes térmicas (termografías) han emergido como una técnica prometedora por ser no invasiva, sin contacto, libre de radiación y económica, lo que la hace viable para la detección temprana del CM. Esta técnica mide los patrones de calor en la piel, que pueden indicar tumores malignos debido al aumento de la perfusión sanguínea y el metabolismo en las células cancerosas (Ring y Ammer, 2012).

A diferencia de otras modalidades, la termografía es eficaz en tejido denso o en etapas iniciales de la enfermedad (McCormack y dos Santos Silva, 2006). A pesar de sus ventajas, las termografías no pueden detectar CM (Din *et al.*, 2022) y la interpretación sigue siendo un reto, ya que el análisis manual puede estar propenso a errores (Figueiredo, 2019). En este sentido, métodos automáticos como las redes neuronales convolucionales (CNNs) han mostrado resultados prometedores en la mejora de la detección de anomalías en imágenes médicas. Sin embargo, su uso en termografías para el diagnóstico del CM aún se encuentra en sus primeras etapas, principalmente

1 <https://gco.iarc.fr/en>

2 Los casos localizados se refieren al cáncer confinado a la mama, mientras que los casos distantes indican que el cáncer se ha propagado a otras partes del cuerpo, como órganos o huesos (metástasis).

debido al costo computacional (Zuluaga-Gomez et al., 2021).

Nuestro estudio se enfoca en afrontar estas limitaciones aplicando modelos preentrenados de aprendizaje profundo, proponiendo los ViT, que han demostrado eficacia en la clasificación de imágenes en diversos dominios³. Aprovechamos transferencia de aprendizaje, reutilizando el conocimiento adquirido por modelos entrenados en grandes conjuntos de datos y adaptándolo a nuevos datos más específicos, como las termografías, con el objetivo de obtener resultados competitivos frente a métodos convencionales.

2. Metodología

2.1 Adquisición de imágenes

En este trabajo se utilizó el conjunto de datos DMR-IR⁴ (Silva et al., 2014), que forma parte de la *Database for Mastology Research*, una plataforma en línea que almacena imágenes mastológicas para la detección temprana de CM. Esta plataforma incluye termografías y mamografías, obtenidas por el Departamento de Ciencia de la Computación de la Universidad Federal Fluminense (IC/UFF). El conjunto de datos utilizado contiene termografías de 56 pacientes, de los cuales 19 son sanos y 37 presentan una mama maligna.

Las imágenes fueron capturadas con una cámara FLIR SC620, que registra temperaturas entre -50°C y 400°C , con un margen de error de 2°C . El protocolo de adquisición basado en Ng (2009) asegura la calidad de las termografías

mediante varias directrices: los pacientes deben evitar café, alcohol, comidas grandes y fumar antes de la prueba. La cámara debe operar 15 minutos antes a 100 mK y 30°C , con una resolución mínima de 120^2 puntos térmicos. Además, la sala debe mantenerse entre $18\text{-}25^{\circ}\text{C}$, con una humedad del 40-75 %, piso alfombrado y evitar fuentes de calor. Los diagnósticos fueron confirmados previamente por expertos mediante mamografías y biopsias.

2.2 Preprocesamiento y aumento de datos

Se realiza el cargue de una matriz de temperatura y las imágenes segmentadas correspondientes a la zona de interés (p. ej., figura 1) con Python, para un total de 1522 imágenes de los 56 pacientes. Se aplicó segmentación binaria sobre la imagen para obtener una máscara. Posteriormente, se multiplicaron las matrices de temperatura por estas máscaras para obtener la imagen segmentada con valores de temperatura. Se siguió la metodología propuesta en (Bhowmik et al., 2018), que incluye redimensionamiento, recorte y normalización respecto a la temperatura máxima de todas las matrices, asegurando la coherencia de las termografías en términos de intensidad. Como resultado tenemos una imagen térmica de 224×224 que reduce el coste computacional en un 75 % y mantiene suficiente detalle. Para el aumento de datos se aplicaron 4 tipos de generación, cada una con una probabilidad del 50 % de realizarse: (I) volteo horizontal, (II) rotación entre 0 y 45 grados, (III) desenfoque gaussiano con un kernel de tamaño 5 y (IV) transformación afín aleatoria (hasta con el 5 % del tamaño de la imagen).

3 Se hace referencia a dominios como la visión por computadora en aplicaciones generales (p. ej., clasificación de objetos).

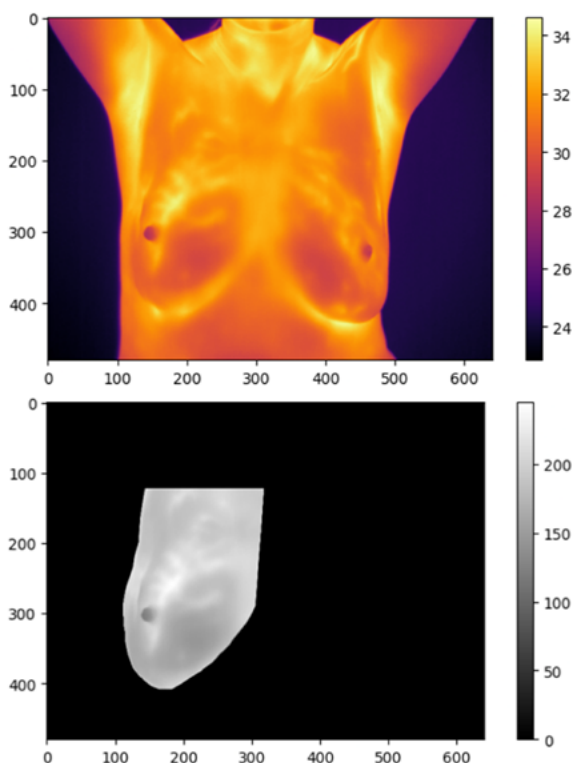
4 <https://visual.ic.uff.br/dmi/>

3.2 Modelos de vanguardia

Utilizamos arquitecturas de aprendizaje profundo que han demostrado ser clave en el campo de la visión por computadora; destacamos su rendimiento en el conjunto de datos *ImageNet* (Deng et al., 2009), una referencia esencial para avances en inteligencia artificial.

Figura 1

Matriz de temperatura e imagen de la zona de interés de paciente enfermo



Fuente: Base de datos DMR-IR

Los modelos implementados en este estudio provienen de *torchvision*⁵ y *timm*⁶, con pesos preentrenados en diferentes versiones de *ImageNet*. *ResNet*, propuesto por He et al. (2015), se distin-

gue por sus conexiones residuales, que permiten entrenar redes profundas al evitar la degradación del gradiente. Usamos su versión de 152 capas, *ResNet152*. *Xception*, desarrollada por Chollet (2016), mejora la eficiencia mediante convoluciones separables en profundidad, lo que la hace menos costosa computacionalmente. Por último, *ViT* (Dosovitskiy et al., 2020) emplea autoatención para procesar imágenes como secuencias, similar al procesamiento de texto. Usamos su versión base, con 16×16 píxeles por cada parche de imagen, *ViT_B_16*.

2.4 División del conjunto de datos

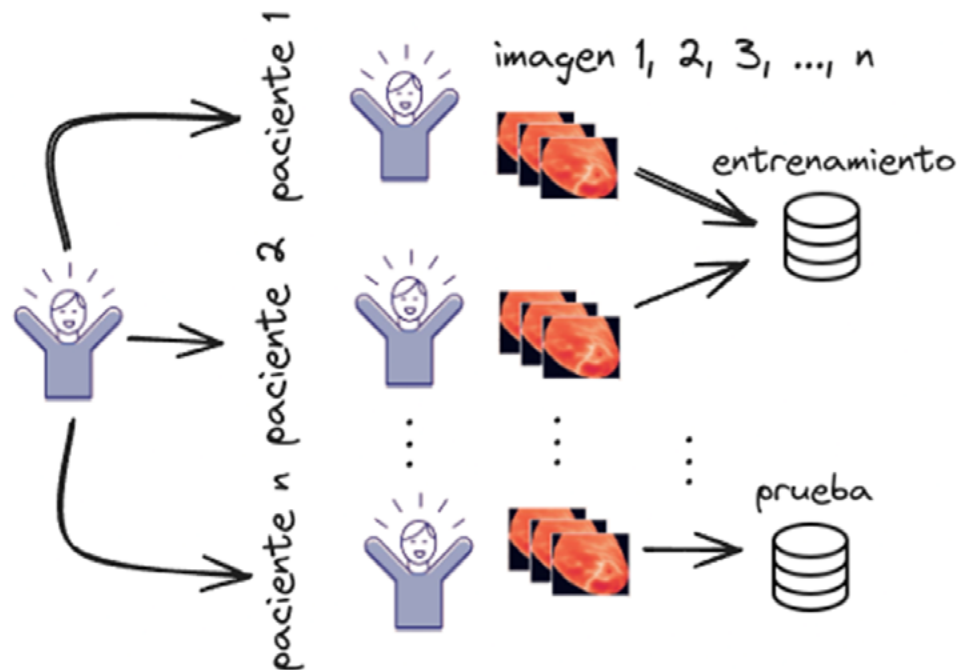
La partición del conjunto de datos se realizó a nivel de pacientes, evitando el enfoque tradicional basado en imágenes. Esto previene que imágenes del mismo paciente se encuentren en ambos conjuntos, lo cual podría sesgar los resultados. Se asignaron 48 pacientes al conjunto de entrenamiento y 8 pacientes al conjunto de prueba (ver figura 2). Además, para las etapas de entrenamiento y prueba, se implementó una división en 7 *folds*, cada uno compuesto por un 15 % (8) de los pacientes, lo cual permite una validación cruzada consistente.

⁵ <https://pytorch.org/vision/stable/models.html#classification>

⁶ <https://pprp.github.io/timm/models/xception/>

Figura 2

Ejemplo de división de los datos



Fuente: elaborada por autores

2.5 Optimización de hiperparámetros

Se ajustaron hiperparámetros de los modelos *Xception*, *ResNet* y *ViT* preentrenados mediante optimización bayesiana, utilizando la plataforma *W&B*⁷. La optimización bayesiana construye un modelo estadístico para predecir el rendimiento en diferentes configuraciones de hiperparámetros. Este modelo probabilístico genera una distribución que estima el error esperado para cada configuración y se actualiza en cada evaluación. En cada iteración, se sugiere una nueva combinación de hiperparámetros con el objetivo de maximizar (o minimizar) métricas, en nuestro caso, el *recall*. Los hiperparámetros ajustados incluyeron el tamaño de lote (*batch_size*), tasa de

aprendizaje (*learning_rate*), optimizador (*optimizer*) y grado de ajuste fino (*fine_tuning*).

La transferencia de aprendizaje consistió en congelar o descongelar capas preentrenadas y ajustar el modelo en un proceso conocido como ajuste fino. En nuestros experimentos, probamos dos enfoques: (I) descongelar solo el clasificador y la primera capa convolucional, mientras las capas intermedias permanecen congeladas; y (II) descongelar todas las capas para ajustar el modelo completamente. Debido al alto costo computacional, se seleccionó aleatoriamente uno de los 7 *folds* en cada iteración, evitando realizar una validación cruzada completa, la cual toma aproximadamente 4 horas por iteración para *ViT*.

2.6 Validación cruzada

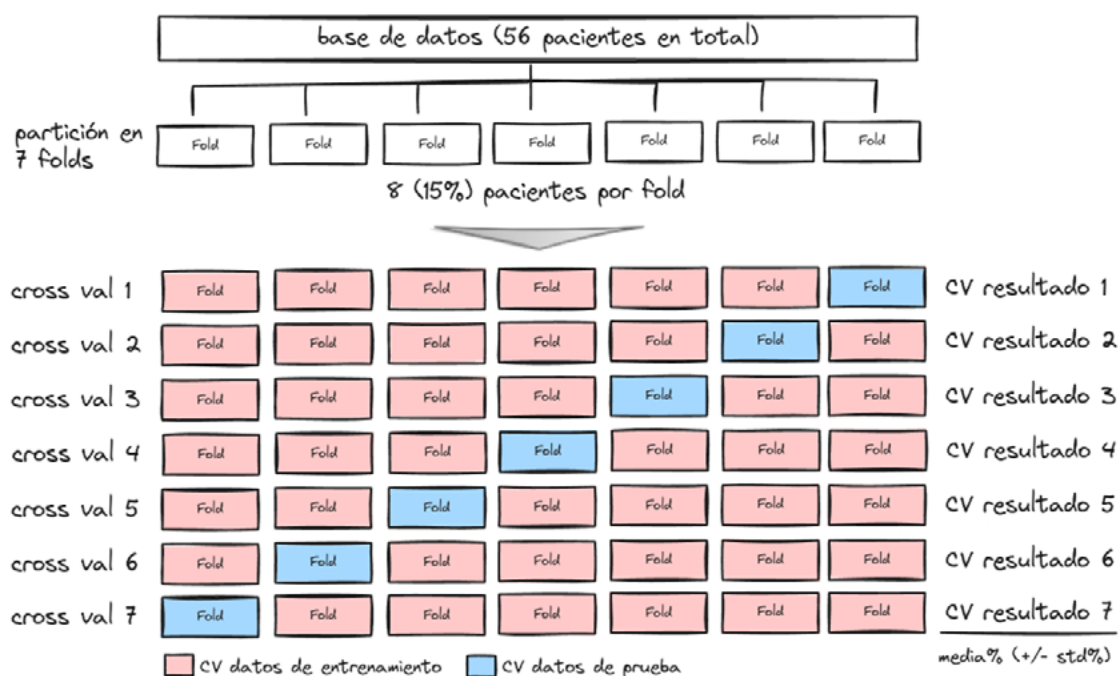
Utilizamos los mejores modelos obtenidos en el proceso de optimización de hiperparámetros y realizamos una validación cruzada para evaluar su desempeño, con la división introducida en la subsección 2.4. En cada iteración, se utilizan 6 *folds* para entrenar el modelo, y el *fold* restante se reserva para probarlo. Este proceso se repite hasta que cada uno de los *folds* haya sido utilizado como conjunto de prueba. Al finalizar las iteraciones, se calcularon la media y desviación estándar de las métricas (ver figura 3): exactitud (*accuracy*), valor-F1 (*F1-score*), precisión (*precision*) y sensibilidad (*recall*), que ofrecen una visión detallada del rendimiento de los modelos.

2.7 Explicabilidad

La explicabilidad en modelos de aprendizaje profundo es crucial en medicina. Saber qué regiones de una imagen son relevantes para las predicciones refuerza la confianza de los médicos en los sistemas automatizados (Hassija et al., 2024). Por ello, implementamos *Gradient-weighted Class Activation Mapping (GradCAM)* (Selvaraju et al., 2016), un método que genera mapas de activación ponderados por gradientes, que destaca las áreas de la imagen que influyen en las decisiones del modelo. Para nuestra investigación, usamos la implementación disponible en la librería *pytorch-grad-cam*⁸. Cargamos los pesos entrenados de cada modelo y seleccionamos las capas previas a la clasificación. Posteriormente, generamos los mapas de activación que resaltan las regiones más relevantes para la predicción.

Figura 3

Validación cruzada por grupos



Fuente: elaborada por autores

8 <https://jacobgil.github.io/pytorch-gradcam-book/>

3. Resultados

Los modelos *ResNet152* y *ViT_B_16* arrojaron los mejores resultados para la clasificación del CM. El modelo *ViT_B_16* obtuvo una exactitud de 95,30 % y una sensibilidad de 91,10 %. Por su parte, *ResNet152* alcanzó una exactitud de 95,19 % y una sensibilidad de 91,13 %. Los resultados completos para cada modelo se muestran en la tabla 1. Los resultados al aplicar *GradCAM* para evaluar

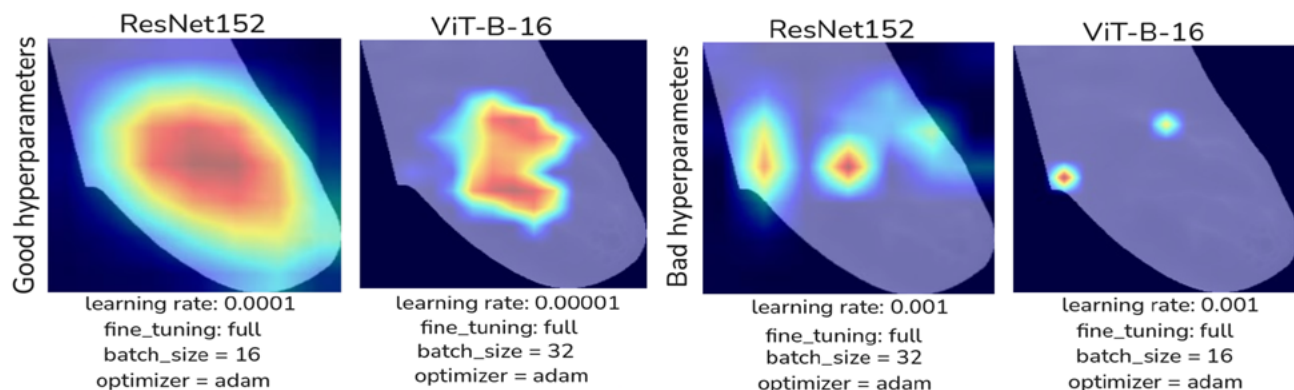
la explicabilidad mostraron que los modelos con buenos resultados, como *ViT_B_16* y *ResNet152*, activaron correctamente las áreas afectadas por la enfermedad, lo cual confirma que las predicciones se basaban en regiones relevantes de las imágenes. En contraste, modelos seleccionados con bajo rendimiento presentaron activaciones dispersas en áreas no relacionadas con la enfermedad. Estas diferencias se ilustran en la figura 4.

Tabla 1
Resultados para cada modelo

Modelo	Accuracy	F1-score	Precision	Recall
ViT-B-16 (Full)	0.9530 ($\pm$ 0.0381)	0.9483 ($\pm$ 0.0453)	0.9957 ($\pm$ 0.0075)	0.9110 ($\pm$ 0.0788)
ResNet-152 (Full + Adam)	0.9519 ($\pm$ 0.0414)	0.9433 ($\pm$ 0.0560)	0.9953 ($\pm$ 0.0055)	0.9113 ($\pm$ 0.0943)
ResNet-152 (Full + SGD)	0.9231 ($\pm$ 0.0525)	0.9093 ($\pm$ 0.0722)	1.0000 ($\pm$ 0.0000)	0.8439 ($\pm$ 0.1165)
ViT-B-16 (Classifier+conv1)	0.9087 ($\pm$ 0.0568)	0.9167 ($\pm$ 0.0523)	0.9063 ($\pm$ 0.0969)	0.9390 ($\pm$ 0.0591)
Xception (Classifier+conv1)	0.8623 (+/- 0.1212)	0.8340 (+/- 0.1418)	0.8984 (+/- 0.1516)	0.7883 (+/- 0.1531)

Fuente: elaborada por autores

Figura 4
Comparación activaciones GradCAM



Fuente: elaborada por autores

4. Discusión

Nuestros hallazgos destacan el rendimiento de los modelos *ViT_B_16* y *ResNet152* en la clasificación de termografías de CM, con exactitudes superiores al 95 %. Comparado con estudios previos, como el de Chatterjee et al. (2022), que reportó una exactitud del 100 % utilizando *VGG16* y el algoritmo *Dragonfly* para selección de características, u trabajos como el de Ekici y Jawzal (2020), que alcanzó una exactitud del 98,95 % mediante optimización bayesiana con CNNs, nuestro enfoque destaca por su capacidad de generalización, gracias a la validación cruzada, para evitar el sobreajuste y el uso de modelos preentrenados. Además, la aplicación de técnicas avanzadas como *GradCAM* mejora la interpretabilidad de las predicciones, un aspecto que no fue abordado en la mayoría de estos trabajos.

Estudios como el de Farooq y Corcoran (2020) utilizaron el modelo *Inception-V3* con preprocesamiento especializado para la normalización y mejora de contraste, obteniendo una exactitud del 80 %, lo que refleja la variabilidad en el rendimiento según el preprocesamiento aplicado. De manera similar, modelos más complejos como *InceptionResNetV2* o *SeResNet18* solo lograron un 90 % y 65 % de exactitud, respectivamente (Zuluaga-Gómez et al., 2021). Esto destaca la robustez de nuestro enfoque de transferencia de aprendizaje con *ViTs*, dado que es la primera vez que se prueba en este conjunto de datos.

5. Conclusiones

Esta investigación destaca la importancia del preprocesamiento de las imágenes y la selección adecuada de hiperparámetros en la optimización de modelos de aprendizaje profundo para detectar anomalías en termografías. Aunque las termografías por sí solas no pueden detectar CM, combinadas con modelos de aprendizaje profundo ofrecen una herramienta valiosa como apoyo a los médicos para la detección temprana. La investigación presenta algunas limitaciones, como el uso exclusivo de una sola base de datos (DMR-IR), lo que restringe la capacidad de generalización de los modelos. Resalta la necesidad urgente de invertir en la creación y disponibilidad de nuevas bases de datos públicas que puedan ampliar el alcance de los modelos de aprendizaje profundo en este campo. Para trabajos futuros, se sugiere explorar enfoques multimodales. La integración de termografías con mamografías disponibles en el mismo conjunto de datos podría resultar en un sistema más robusto en la detección del CM.

Agradecimientos

Agradecemos al Semillero de Investigación Hands-On Computer Vision por su valiosa dirección y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Bhowmik, M. K., Gogoi, U. R., Majumdar, G., Bhattacharjee, D., Datta, D., Ghosh, A. K., Bhowmik, M. K., Gogoi, U. R., Majumdar, G., Bhattacharjee, D., Datta, D. & Ghosh, A. K. (2018). Designing of ground-truth-annotated DBT-TU-JU breast thermogram database toward early abnormality prediction. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(4), 1238–1249.
- Bray, F., Laversanne, M., Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Soerjomataram, I. & Jemal, A. (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 74(3), 229–263.
- Chatterjee, S., Biswas, S., Majee, A., Sen, S., Oliva, D. & Sarkar, R. (2022). Breast cancer detection from thermal images using a Grunwald-Letnikov-aided Dragonfly algorithm-based deep feature selection method. *Computers in Biology and Medicine*, 141(105027), 105027.
- Chollet, F. (2016). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In *arXiv [cs.CV]*. arXiv. <http://arxiv.org/abs/1610.02357>
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K. & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 248–255.
- Din, N. M. U., Dar, R. A., Rasool, M. & Assad, A. (2022). Breast cancer detection using deep learning: Datasets, methods, and challenges ahead. *Computers in Biology and Medicine*, 149, 106073.
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J. & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. In *arXiv [cs.CV]*. arXiv. <http://arxiv.org/abs/2010.11929>
- Ekici, S. & Jawzal, H. (2020). Breast cancer diagnosis using thermography and convolutional neural networks. *Medical Hypotheses*, 137(109542), 109542.
- Farooq, M. A. & Corcoran, P. (2020). Infrared imaging for human thermography and breast tumor classification using thermal images. *2020 31st Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, 1–6.
- Figueiredo, A. A. A., do Nascimento, J. G., Malheiros, F. C., da Silva Ignacio, L. H., Fernandes, H. C. & Guimaraes, G. (2019). Breast tumor localization using skin surface temperatures from a 2D anatomic model without knowledge of the thermophysical properties. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 172, 65–77.
- Giaquinto, A. N., Sung, H., Miller, K. D., Kramer, J. L., Newman, L. A., Miniham, A., Jemal, A. & Siegel, R. L. (2022). Breast Cancer Statistics, 2022. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 72(6), 524–541.
- Grigorean, V. T. & Cristian, D. A. (2022). Cancer-Yesterday, Today, Tomorrow. *Medicina*, 59(1). <https://doi.org/10.3390/medicina59010098>

- Hassija, V., Chamola, V., Mahapatra, A., Singal, A., Goel, D., Huang, K., Scardapane, S., Spinelli, I., Mahmud, M. & Hussain, A. (2024). Interpreting Black-Box Models: A Review on Explainable Artificial Intelligence. *Cognitive Computation*, 16(1), 45–74.
- He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J. (2015). Deep residual learning for image recognition. In *arXiv [cs.CV]*. arXiv. <http://arxiv.org/abs/1512.03385>
- McCormack, V. A. & dos Santos Silva, I. (2006). Breast density and parenchymal patterns as markers of breast cancer risk: a meta-analysis. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: A Publication of the American Association for Cancer Research, Cosponsored by the American Society of Preventive Oncology*, 15(6), 1159–1169.
- Ng, E. Y.-K. (2009). A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(5), 849–859.
- Ring, E. F. J. & Ammer, K. (2012). Infrared thermal imaging in medicine. *Physiological Measurement*, 33(3), R33–R46.
- Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D. & Batra, D. (2016). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via Gradient-based localization. In *arXiv [cs.CV]*. arXiv. <https://doi.org/10.1007/s11263-019-01228-7>
- Silva, L. F., Saade, D. C. M., Sequeiros, G. O., Silva, A. C., Paiva, A. C., Bravo, R. S. & Conci, A. (2014). A new database for breast research with infrared image. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 4(1), 92–100.
- Zhang, X., Zhang, Y., Qian, B., Liu, X., Li, X., Wang, X., Yin, C., Lv, X., Song, L. & Wang, L. (2019). Classifying Breast Cancer Histopathological Images Using a Robust Artificial Neural Network Architecture. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 204–215.
- Zuluaga-Gómez, J., Al Masry, Z., Benaggoune, K., Meraghni, S. & Zerhouni, N. (2021). A CNN-based methodology for breast cancer diagnosis using thermal images. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 9(2), 131–145.

Sistemas dinámicos en infraestructura vial: modelado de las ecuaciones de deterioro en afirmados del Banco Mundial

Sebastián Blackburn Ortiz

Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
sebastian2238308@correo.uis.edu.co

Miller Humberto Salas Rondón

Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
mihsalas@uis.edu.co

Yerly Fabián Estupiñán Martínez

Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
yerfamar@uis.edu.co

Resumen

La dinámica de sistemas es una herramienta que permite el modelado y comprensión de las interacciones complejas entre diversas variables a lo largo del tiempo. En este contexto se aborda la dinámica del deterioro de afirmados en carreteras terciarias, tomando como punto de partida las ecuaciones del Banco Mundial usadas en el programa “*Deterioration of Unpaved Roads Model*” (DETOUR). El problema central consiste en comprender la compleja interacción entre variables críticas como el gradiente longitudinal, la precipitación y el tránsito vehicular, y de qué manera influyen en el deterioro de su vida útil. La metodología empleada se centra en usar las ecuaciones de deterioro de afirmados del Banco Mundial en un modelo dinámico, validándolo con datos predeterminados del modelo existente

para este tipo de vías. Entre las conclusiones se destacan la efectividad del modelo dinámico para representar el proceso de deterioro, la significativa influencia de la interacción entre variables en los resultados y la identificación de posibles ajustes que permitirían una representación más real del deterioro de las vías. Este enfoque no solo contribuye a una comprensión más profunda del deterioro vial, sino que proporciona una herramienta práctica para la toma de decisiones en la gestión y planificación de vías terciarias del país.

Palabras clave: deterioro vial, sistemas dinámicos, afirmados, Banco Mundial, HDM-4.

1. Introducción

Las carreteras sin pavimentar constituyen una parte considerable de la red vial de muchos países. Estas infraestructuras desempeñan un papel crucial en el desarrollo de actividades socioeconómicas y la mejora de los sectores agrícola, productivo, generación de empleo y accesibilidad a salud y educación en regiones apartadas. De este modo, las carreteras sin pavimentar benefician a los sectores subdesarrollados, rurales y remotos, y actúan como salvavidas para estas comunidades geográficamente desfavorecidas. Las actividades de mantenimiento frecuentes y regulares mantienen el sistema de carreteras operativo al nivel de servicio deseado (Alam-Khan et al., 2023).

La infraestructura vial, especialmente en áreas rurales, constituye un componente crítico para el desarrollo económico y social de una nación. En el caso de Colombia, un país caracterizado por su diversidad geográfica y variabilidad climática, las vías no pavimentadas representan una red vital para el acceso a servicios y la conectividad de comunidades remotas. Sin embargo, estas vías enfrentan un deterioro acelerado que requiere una gestión efectiva y sostenible para garantizar su funcionalidad a largo plazo (INVIAS, 2016).

La literatura existente ha abordado diversas facetas de la gestión de infraestructuras viales, con un enfoque particular en la pavimentación y mantenimiento de carreteras asfaltadas. Aunque se han realizado avances significativos en este campo, hay una notoria brecha en la investigación que se centra en la gestión de vías no pavimentadas en contextos rurales, especialmente en el contexto específico de Colombia. Esta falta de atención a las vías no pavimentadas rurales se traduce en una ausencia de datos, modelos y herramientas específicamente adaptados a estas condiciones,

lo cual limita la capacidad de los entes territoriales responsables para tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y la asignación de recursos (Linard, 2009). Los métodos y enfoques tradicionales de gestión vial pueden no ser aplicables de manera directa debido a las particularidades que caracterizan a estas vías. Asimismo, la relación entre factores climáticos, geográficos y la rugosidad de la superficie vial no ha sido suficientemente explorada en la literatura existente.

Una de las herramientas más conocidas en la gestión de infraestructuras viales, por el análisis, planificación y evaluación del mantenimiento, mejoras y decisiones de inversión de las carreteras, es el “*Highway Development and Management*” (HDM-4). En este sistema se desarrollaron unas ecuaciones que permiten predecir el deterioro de las superficies de las carreteras y la consiguiente pérdida de grava. Esta capacidad predictiva permite intervenciones oportunas, y garantiza que las carreteras permanezcan operativas y seguras para los usuarios (Alam-Khan et al., 2023). Estas ecuaciones tienen en cuenta parámetros granulométricos, geométricos, climáticos, de tránsito y periodicidad de mantenimientos (Uys, 2011).

En este sentido, la dinámica de sistemas ofrece un enfoque interdisciplinario que estudia, modela y analiza sistemas complejos a lo largo del tiempo. Se centra en comprender cómo las interacciones entre diferentes componentes afectan el comportamiento del sistema, con el objetivo de comprender y gestionar mejor el sistema en su conjunto (Linard, 2010). Por lo cual, la investigación busca abordar esta problemática mediante la aplicación de la dinámica de sistemas al modelado del deterioro de los afirmados en vías terciarias, utilizando las ecuaciones del HDM-4 desarrolladas por el Banco Mundial como punto de partida.

2. Alcance y objetivos

Este trabajo de investigación se centra en el modelado dinámico del deterioro de vías en afirmado utilizando las ecuaciones definidas por el HDM-4, con el fin de identificar las variables más críticas y reconocer posibles cambios que permitan un análisis más representativo de la realidad.

2.1 Objetivo general

2.1.1 Establecer un modelo dinámico, basado en las ecuaciones del Banco Mundial, para analizar la evolución temporal del deterioro de afirmados en vías terciarias, identificando las variables críticas.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Primero, comprender la interacción compleja entre variables presentes en las ecuaciones del modelo del HDM-4 en el proceso de deterioro de los afirmados.

2.2.2 Segundo, desarrollar el sistema dinámico con base en la interacción compleja de las variables existentes en el modelo de deterioro de afirmados del HDM-4.

2.2.3 Tercero, validar el sistema dinámico utilizando datos predeterminados del modelo HDM-4 de vías en afirmado.

3. Metodología

La metodología diseñada para abordar la investigación sobre el deterioro de afirmados en vías terciarias se distingue por su enfoque riguroso y avanzado. Este proceso metodológico, funda-

mentado en principios de dinámica de sistemas y modelado matemático, busca desentrañar las complejidades intrínsecas de la interacción entre variables cruciales como el gradiente longitudinal, la precipitación y el tránsito vehicular.

3.1 Revisión y comprensión de las ecuaciones del Banco Mundial

Se busca profundizar en el análisis de las ecuaciones de deterioro desarrolladas por el Banco Mundial, comprendiendo la relación entre las variables y su aplicabilidad al contexto de las vías terciarias colombianas.

3.2 Formulación del modelo dinámico

Se adaptan las ecuaciones del Banco Mundial en un modelo matemático dinámico que refleja la evolución temporal del deterioro de afirmados. Se integran variables adicionales, según sea necesario, para capturar la complejidad del sistema.

3.3 Validación con datos predeterminados

Utilizar datos predeterminados del modelo HDM-4 y específicos de vías terciarias para validar el modelo dinámico.

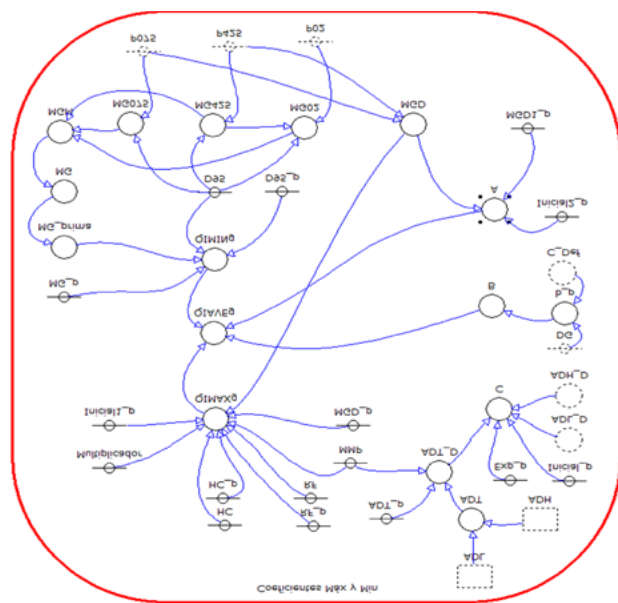
4. Resultados y discusiones

El modelado de las ecuaciones de deterioro desarrolladas por el Banco Mundial en un sistema dinámico permite la identificación de siete grupos fundamentales de resultados, cada uno esencial para comprender la dinámica del deterioro de

afirmados en vías terciarias: el cálculo de índice de rugosidad internacional (IRI) máximo y mínimo (figura 1), el crecimiento de tránsito (figura 2), la recurrencia de la política de mantenimiento (figura 3), la granulometría (figura 4), la progresión tanto del tiempo (figura 5) como del IRI (figura 6) y la pérdida de material (figura 7).

Figura 1

Sistema dinámico para el cálculo de coeficientes máximo y mínimo de IRI



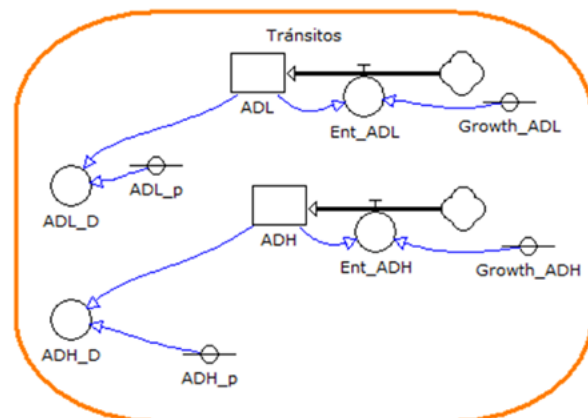
Fuente: elaboración propia.

4.1 Cálculo de IRI máximo y mínimo

Este grupo se centra en determinar el valor máximo y mínimo del índice de rugosidad internacional (IRI), un indicador crucial del estado de la superficie vial. En este apartado se proporciona un rango completo de la rugosidad de la carretera, lo que influye directamente en la comodidad del viaje y el desgaste de los vehículos.

Figura 2

Sistema dinámico de progresión de tránsito diario



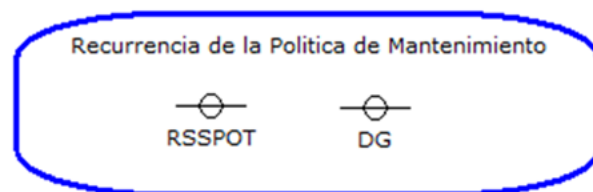
Fuente: elaboración propia.

4.2 Crecimiento de tránsito

Este apartado se refiere al análisis del aumento o cambio en el volumen de vehículos que transitan por la vía con el tiempo. Este grupo evalúa cómo será la progresión del volumen de tránsito que recorre la carretera, y proporciona información esencial para anticipar las demandas futuras y planificar intervenciones de mantenimiento.

Figura 3

Input de política de mantenimiento



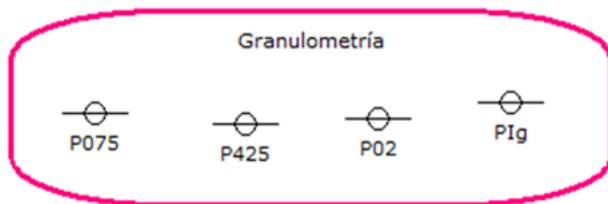
Fuente: elaboración propia.

4.3 Recurrencia de la política de mantenimiento

Esta se ocupa de la frecuencia y regularidad con la que se implementan actividades de mantenimiento en la carretera, y se mide en términos de cantidad de días entre perfilados y cantidad de metros cúbicos de recarga de grava al año por kilómetro.

Figura 4

Input de granulometría para sistema dinámico



Fuente: elaboración propia.

4.4 Granulometría

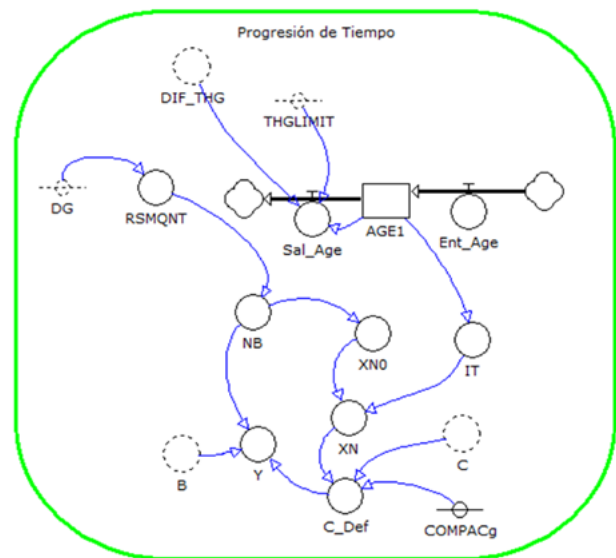
Aborda la distribución de tamaños de partículas en el material utilizado en la construcción y mantenimiento de la carretera. Este grupo examina la composición del afirmado, e influye directamente en su resistencia y durabilidad.

4.5 Progresión de tiempo

Se refiere al análisis de la evolución temporal del estado de la carretera. Este grupo define ciertas condiciones dependiendo de cómo cambian las condiciones de la vía con el tiempo.

Figura 5

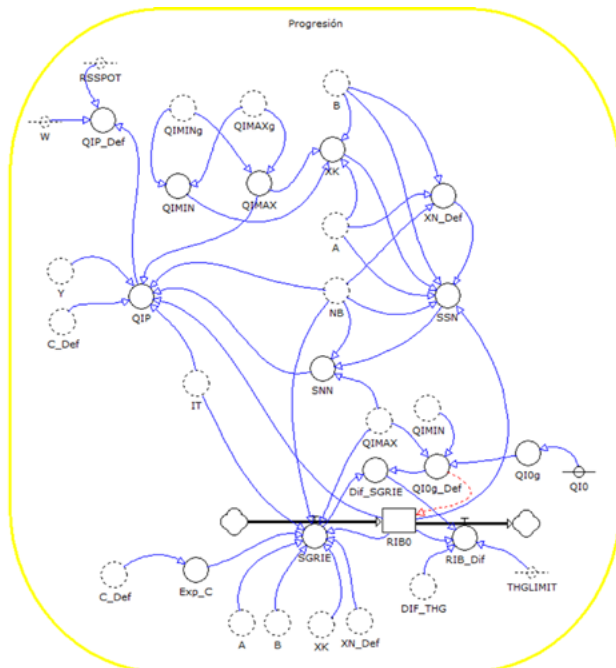
Sistema dinámico de progresión de tiempo



Fuente: elaboración propia.

Figura 6

Sistema dinámico de progresión de IRI



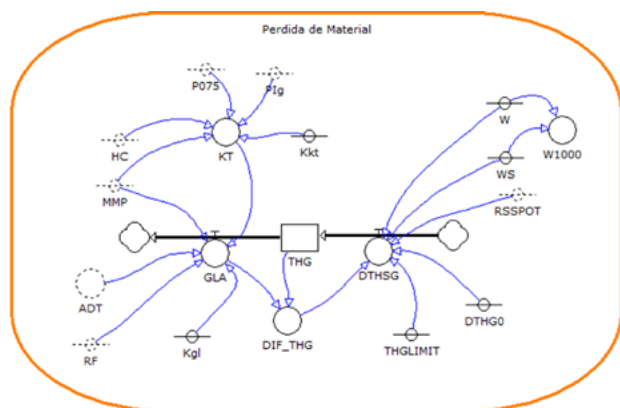
Fuente: elaboración propia.

4.6 Progresión de IRI

Se concentra en el análisis de la evolución del índice de rugosidad internacional a lo largo del tiempo. Este indicador dinámico proporciona información valiosa sobre la degradación de la superficie vial y es el resultado más esperado para lograr predecir el comportamiento de los afirmados.

Figura 7

Sistema dinámico de pérdida de material de la superficie



Fuente: elaboración propia.

4.7 Pérdida de material

Se refiere a la cantidad de material que la carretera pierde con el tiempo, ya sea debido a factores climáticos o tráfico.

Una vez se completa el sistema dinámico, se realiza una validación del modelo comparando los resultados entre las ecuaciones y el *software* usado para modelar; se encuentra una variación de entre 0,048 % y 0,151 % del valor esperado del coeficiente de rugosidad, como se muestra en la tabla 1. Mientras que en la pérdida de material dio valores exactos.

Tabla 1

Comparativa de valores de IRI

IRI Calculado	IRI Modelado	Error %
7,6126483	7,612648281	0,000%
9,3437049	9,343704929	0,000%
10,5179084	10,51790844	0,000%
10,9752560	10,97525599	0,000%
11,1692391	11,16923912	0,000%
11,2941418	11,29414178	0,000%
11,4016975	11,40169746	0,000%
11,5054915	11,50549151	0,000%
11,6037348	11,60373483	0,000%
6,8296670	6,832969294	0,048%
8,1541666	8,163578527	0,115%
10,2866359	10,30178227	0,147%
11,5624297	11,57925243	0,145%
11,9811198	11,99889825	0,148%
12,1537788	12,17193594	0,149%
12,2705311	12,28893563	0,150%
12,3751415	12,39376482	0,150%
12,4774891	12,49632574	0,151%
12,5797396	12,59878925	0,151%

Fuente: elaboración propia.

Este error en el sistema dinámico modelado puede ser una limitación dentro del *software*, debido al uso de algunos condicionales incompatibles con el paso de las iteraciones posteriores a la recarga de grava.

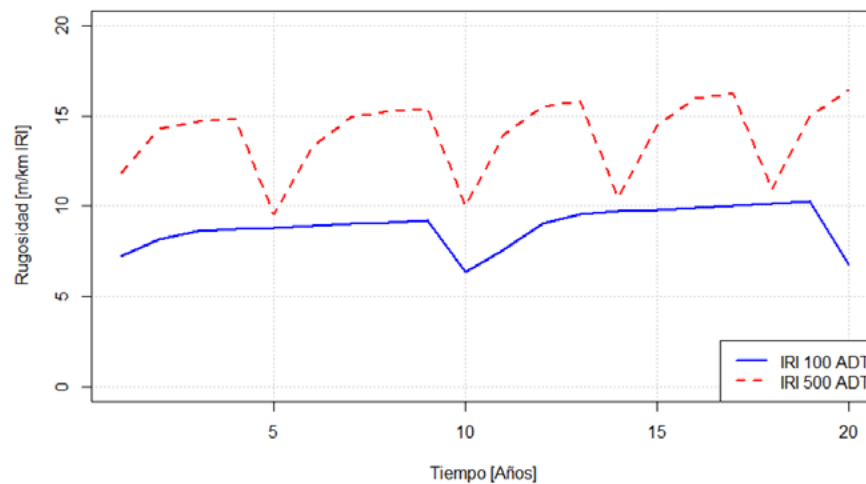
Siguiendo el procedimiento descrito por William Paterson (1991) para evaluar el efecto de las políticas de mantenimiento sobre la rugosidad de vías afirmadas, se realizan las variaciones presentadas

en la figura 8 para (a) una vía sometida a un mantenimiento regular de perfilado cada 90 días con diferentes volúmenes de tráfico y (b) una vía bajo distintas políticas de perfilado (cada 30, 90 y 360 días) con un único nivel de tráfico. El material

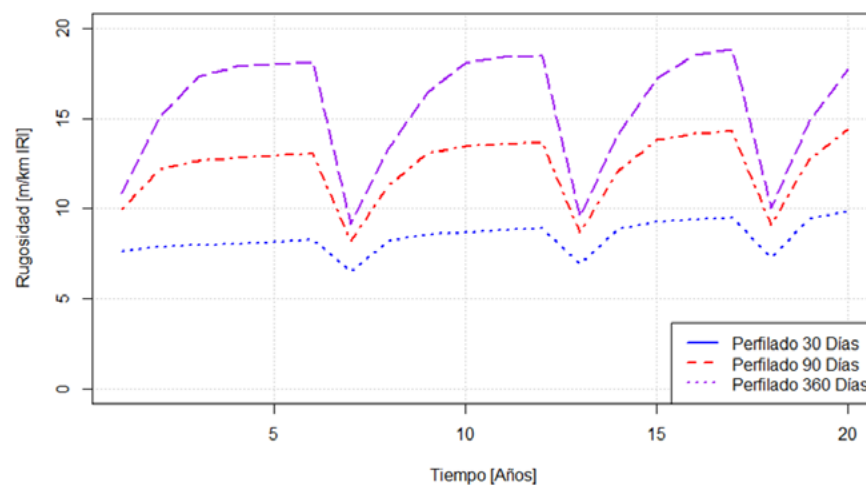
empleado es grava de tamaño medio ($D_{95} = 2,9 \text{ mm}$), con leve plasticidad, alta proporción de finos ($MGD = 0,61$) y una gradación intermedia ($MG = 0,23$) (Paterson, 1991).

Figura 8

a. Efecto sobre el volumen de tráfico con una política regular de perfilado cada 90 días



b. Efectos de la frecuencia de perfilado en un volumen de tráfico de 300 vehículos/día



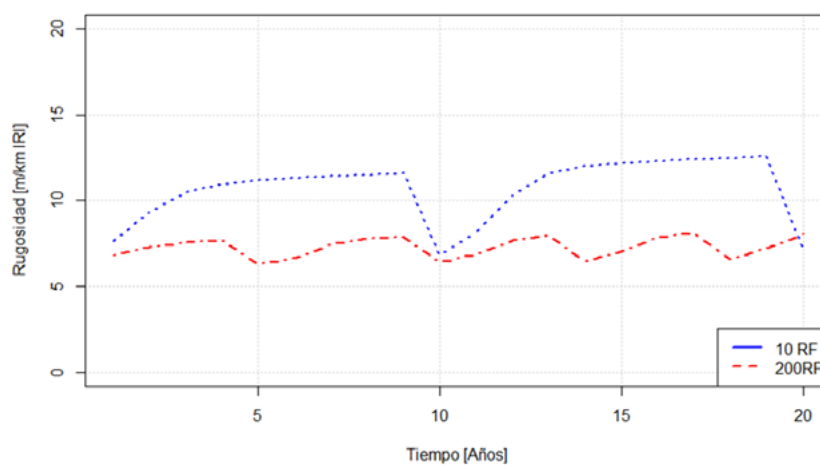
Fuente: elaboración propia.

En la figura 8a se observa una mayor pérdida de material, lo que genera una mayor necesidad de recarga de grava en toda la vía. Asimismo, el índice de rugosidad internacional (IRI) se mantiene constantemente en un rango que hace que las condiciones de transitabilidad en la vía sean incómodas e inseguras.

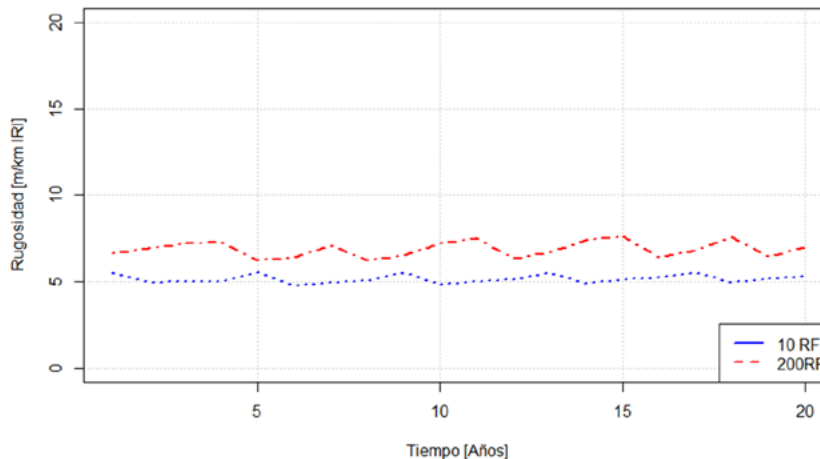
Por otro lado, en la figura 8b se observa que, aunque la cantidad de recarga de grava es la misma, las condiciones de transitabilidad resultan más cómodas y seguras cuando se realiza un perfilado a intervalos de tiempo más cortos.

Figura 9

a. *Efecto de la pendiente sobre el índice de regularidad internacional.*



b. *Efecto de la tortuosidad sobre el índice de regularidad internacional.*



Fuente: elaboración propia.

Es relevante considerar los parámetros geométricos de la vía, como la pendiente longitudinal (m/km) y la tortuosidad (°/km). En la figura 9, realizada para un tránsito promedio diario de 300 veh./día, se aplica una política de perfilado cada 180 días, manteniendo las mismas especificaciones granulométricas mencionadas.

En la figura 9a, al variar la pendiente longitudinal, se observa un comportamiento inesperado: una mayor pendiente se asocia con un mejor índice de rugosidad internacional (IRI), posiblemente porque la vía pierde material de una manera más rápida y esto a su vez acelera la recarga de grava, manteniéndola en condiciones óptimas. En la figura 9b, al simular una vía con alta pendiente (RF = 200 m/km), se observa que la tortuosidad no tiene una influencia significativa sobre el IRI.

En este análisis, se destaca la influencia directa de la precipitación en dos aspectos críticos: el cálculo del IRI máximo y la pérdida de material. La variabilidad de la precipitación, expresada en unidades de m/mes, emerge como un factor determinante en el deterioro vial, y afecta indirectamente la progresión de IRI, que a su vez define el ciclo de vida de la carretera en afirmado.

Al modificar los valores de precipitación para simular diversas regiones del país, se identificó una posible limitación en las ecuaciones, ya que, para valores superiores a 0,35 m/mes, los resultados obtenidos no corresponden con un resultado práctico.

Es crucial señalar que, según las ecuaciones del HDM-4, la precipitación se considera como una constante, si se asume uniformidad en la intensidad de las lluvias a lo largo del tiempo. Sin embargo, este supuesto puede resultar insuficiente, especialmente en países con climas tropicales

como Colombia, caracterizados por regímenes bimodales y variaciones significativas en las condiciones climáticas entre las regiones.

5. Conclusiones e investigaciones futuras

En conclusión, este estudio proporciona una comprensión profunda de la dinámica del deterioro de afirmados en vías terciarias; se destaca la influencia significativa de variables clave como el índice de rugosidad internacional (IRI), la precipitación y la política de mantenimiento. La variabilidad de la precipitación emerge como un factor crítico, que influencia directamente el cálculo del IRI máximo y la pérdida de material, con impactos indirectos en la progresión de IRI. Sin embargo, se observa una limitación en la consideración de la precipitación como una constante, especialmente en regiones con regímenes climáticos diversos.

Para futuras investigaciones, se recomienda una adaptación regional más detallada en los modelos de deterioro, que incorpore variables climáticas dinámicas y específicas de cada región. Se sugiere explorar la dinámica temporal de la precipitación y considerar otros factores climáticos, como la temperatura y la humedad, para mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos. Además, la validación empírica extensa en diversas regiones geográficas contribuirá a evaluar la robustez del modelo en contextos climáticos diversos. La inclusión de análisis de sensibilidad más detallados y la consideración de factores adicionales, como la calidad de la granulometría, enriquecerán aún más la capacidad predictiva de los modelos. Para finalizar, se recomienda integrar en el modelo un sistema de comunicación, dado que este permite a los responsables políticos y a los gestores de

infraestructura entender mejor las necesidades y preocupaciones de los usuarios de las carreteras. Esto es fundamental para equilibrar las demandas de calidad de las vías con otras prioridades públicas, como la reducción de impuestos o la financiación de servicios sociales. En última instancia, estas recomendaciones buscan mejorar la representación de la complejidad del deterioro vial, proporcionando herramientas más precisas para la gestión sostenible del mantenimiento en las vías terciarias.

Referencias

- Alam-Khan, S., Cetin, B., Jeong, H. D., & Ashlock, J. C. (2023). Gravel Loss Prediction Model Using Beta Regression. *Transportation Research Record*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/03611981221148696>
- INVIAS. (2016). *Manual de Mantenimiento de Carreteras* (Vol. 1).
- Linard, K. (2009). *Application of System Dynamics to Unsealed Pavement Maintenance*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18221717>
- Linard, K. (2010). *A System Dynamics Modelling Approach to Gravel Road Maintenance Management*.
- Paterson, W. D. O. (1991). Deterioration and maintenance of unpaved roads: models of roughness and material loss. *Transportation Research Record*, 1291, 143–156. <http://dx.doi.org/>
- Uys, R. (2011). Evaluation of gravel loss deterioration models. *Transportation Research Record*, 2205, 86–94. <https://doi.org/10.3141/2205-12>

Catálogo ilustrado de geomorfología en el Cañón del Chicamocha, región del departamento de Santander

Evelyn Ortega Martínez

Geología, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
evelyn2180586@correo.uis.edu.co

Francisco A. Velandia Patiño

Geología, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
favelanp@uis.edu.co

Resumen

El Cañón del Chicamocha exhibe una gran variedad geológica y geomorfológica, resultado de eventos meteorológicos, tectónicos y magmáticos tanto a nivel local como regional. Debido a sus características únicas, se ha propuesto su candidatura para ser reconocido en la red mundial de geoparques de la UNESCO. Los procesos naturales influyen directamente en las formas de vida de una región, por lo que es crucial que la comunidad se involucre en el conocimiento geocientífico. Este conocimiento no solo es fundamental para la toma de decisiones, sino que también fomenta la divulgación y puede integrarse en la educación y la conservación del medio ambiente.

te. A través de herramientas de geoeducación, como ilustraciones didácticas, es posible acercar conceptos geológicos a la población, simplificando la información y centrándose en las características visibles de la geomorfología. El trabajo de grado “Catálogo ilustrado de geomorfología en el Cañón del Chicamocha, región del departamento de Santander” muestra ilustraciones explicativas de la geomorfología de la zona, la identificación de elementos geológicos, litología, estructuras que influyen en la evolución del paisaje.

Palabras clave: ilustración científica, geomorfología, Cañón del Chicamocha, geoeducación, divulgación.

1. Introducción

El desarrollo de estudios centrados en geología regional y estructural, geomorfología y patrimonio geológico facilita el entendimiento del área, lo que permite crear material que convierte esta información en un formato interpretado. En este formato, se destaca la información clave para entender las formas del paisaje en el Cañón del Chicamocha. El trabajo abarca la exploración e identificación geomorfológica a lo largo del río Chicamocha, desde la cuenca media en Soatá hasta el municipio de Los Santos, y lo presenta a través de ilustraciones científicas basadas en imágenes otorgadas por los autores. Promover una sólida educación geológica es fundamental para mejorar nuestra relación con el entorno.

2. Metodología

El proyecto sigue una metodología dividida en cinco fases. Inicia con la recopilación del estado del arte y del material disponible para la identificación y representación de los ambientes geomorfológicos, un proceso continuo que acompaña el desarrollo de las fases posteriores. Estas fases incluyen una dinámica de observación y análisis geológico, con el fin de generar los resultados que se registrarán como geoformas.

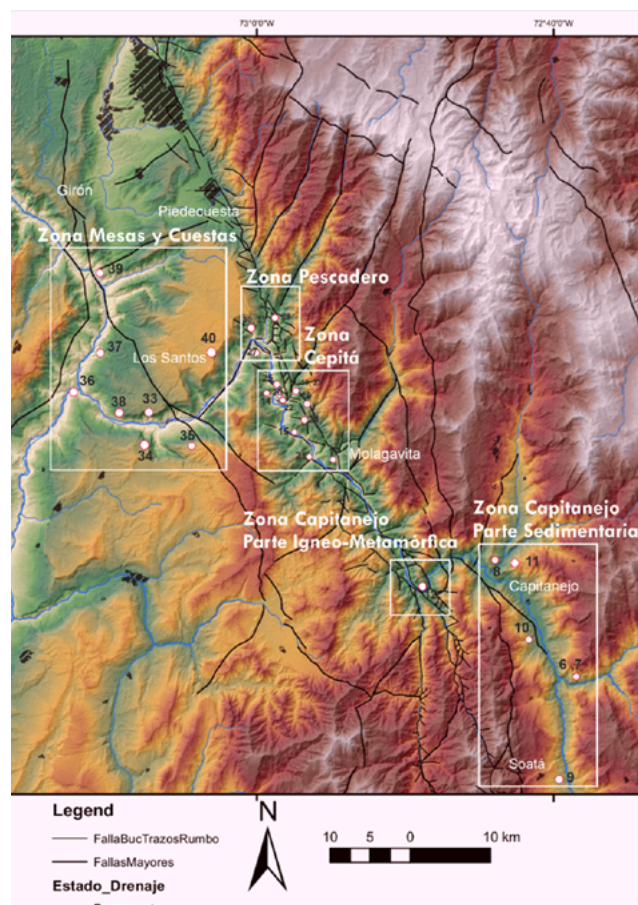
3. Resultados

Se eligieron 27 locaciones de interés, divididas en cinco zonas, de acuerdo con su ubicación y el ambiente geomorfológico. Las ilustraciones fueron creadas siguiendo el estilo de la autora y las indicaciones de la guía práctica de dibujo geológico de Matthew Genge (2020). Las fotografías

utilizadas provienen de distintos autores. Google Earth se empleó como herramienta complementaria para observar el relieve y vincular el ambiente geomorfológico con la traza de las fallas. Las imágenes capturadas fueron ilustradas, proporcionando nuevas perspectivas para el análisis.

Figura 1

Mapa de las zonas de estudio

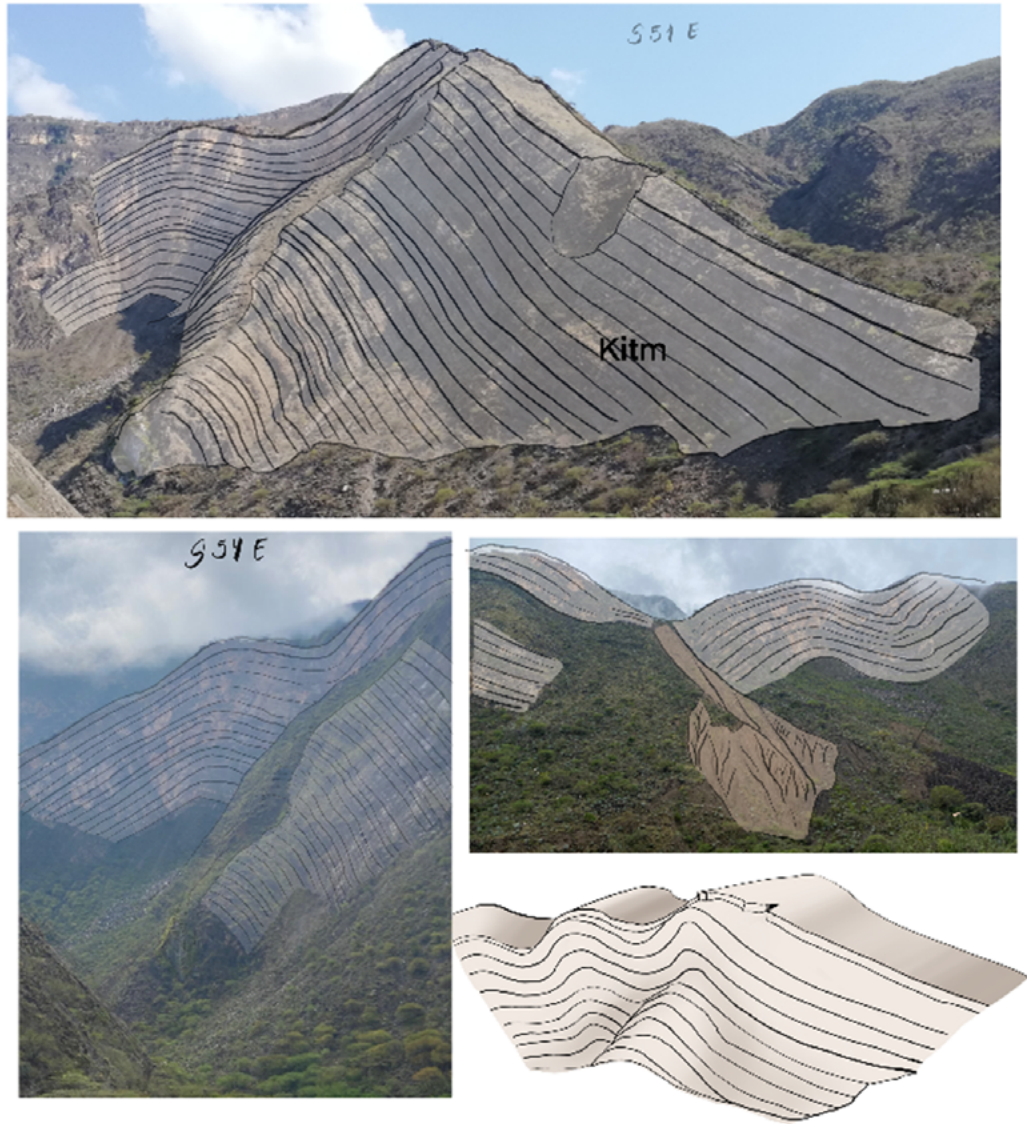


Se realizó el análisis geomorfológico de la cuenca hidrográfica del río Chicamocha, desde la cuenca media en Soatá, hasta la unión con el río Suárez, continuando por el río Sogamoso en el municipio de Los Santos⁹.

3.1 Zona Capitanejo (parte sedimentaria)

Figura 2

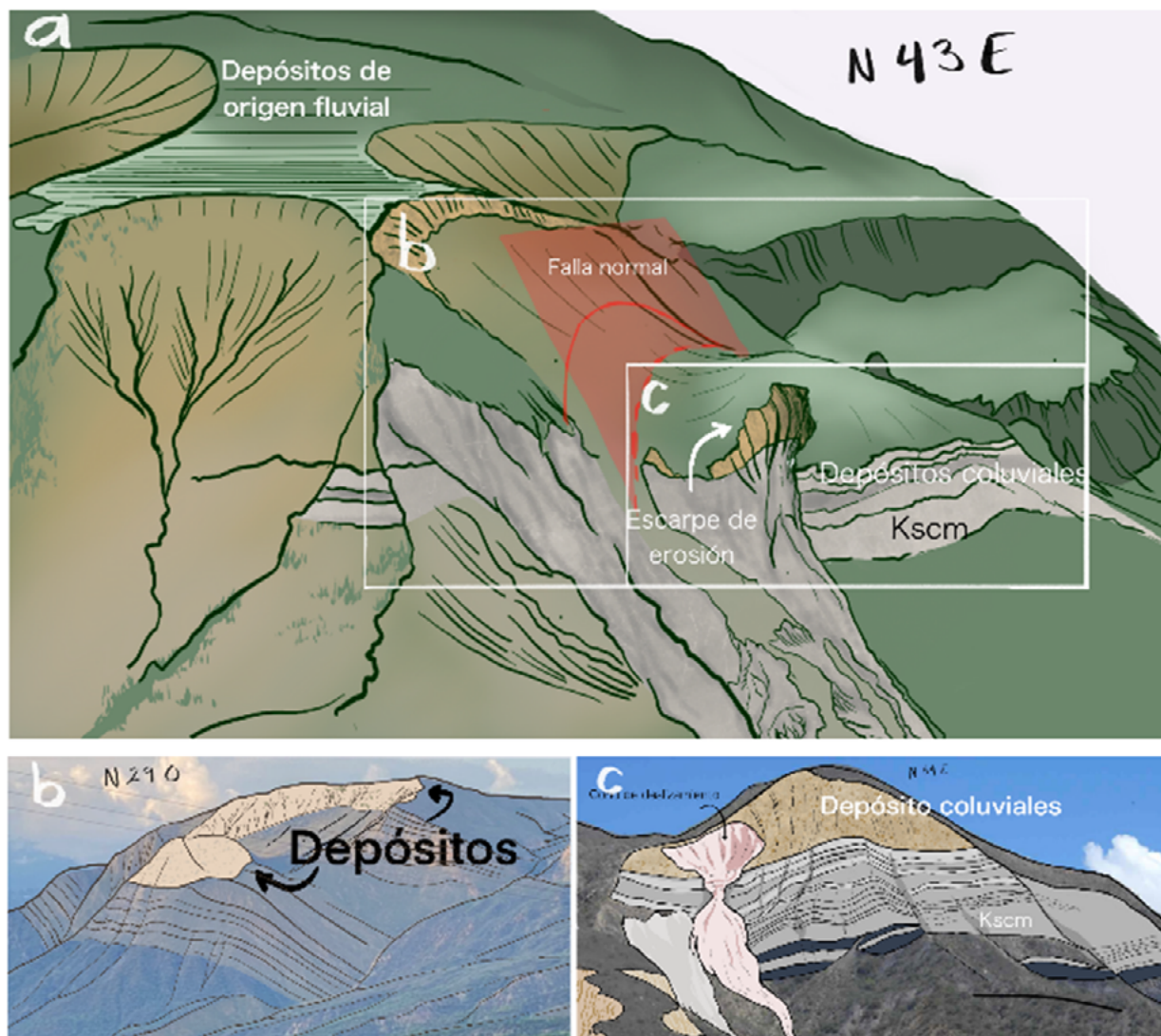
El río Nevado



El río Nevado deja observar los estratos de las formaciones cretácicas Tibú-Mercedes (Kitm), que conforman pliegues complejos, resultado

del ambiente compresivo de la zona en estilo estructural de piel delgada.

Figura 3
Vereda La Mesa, Capitanejo

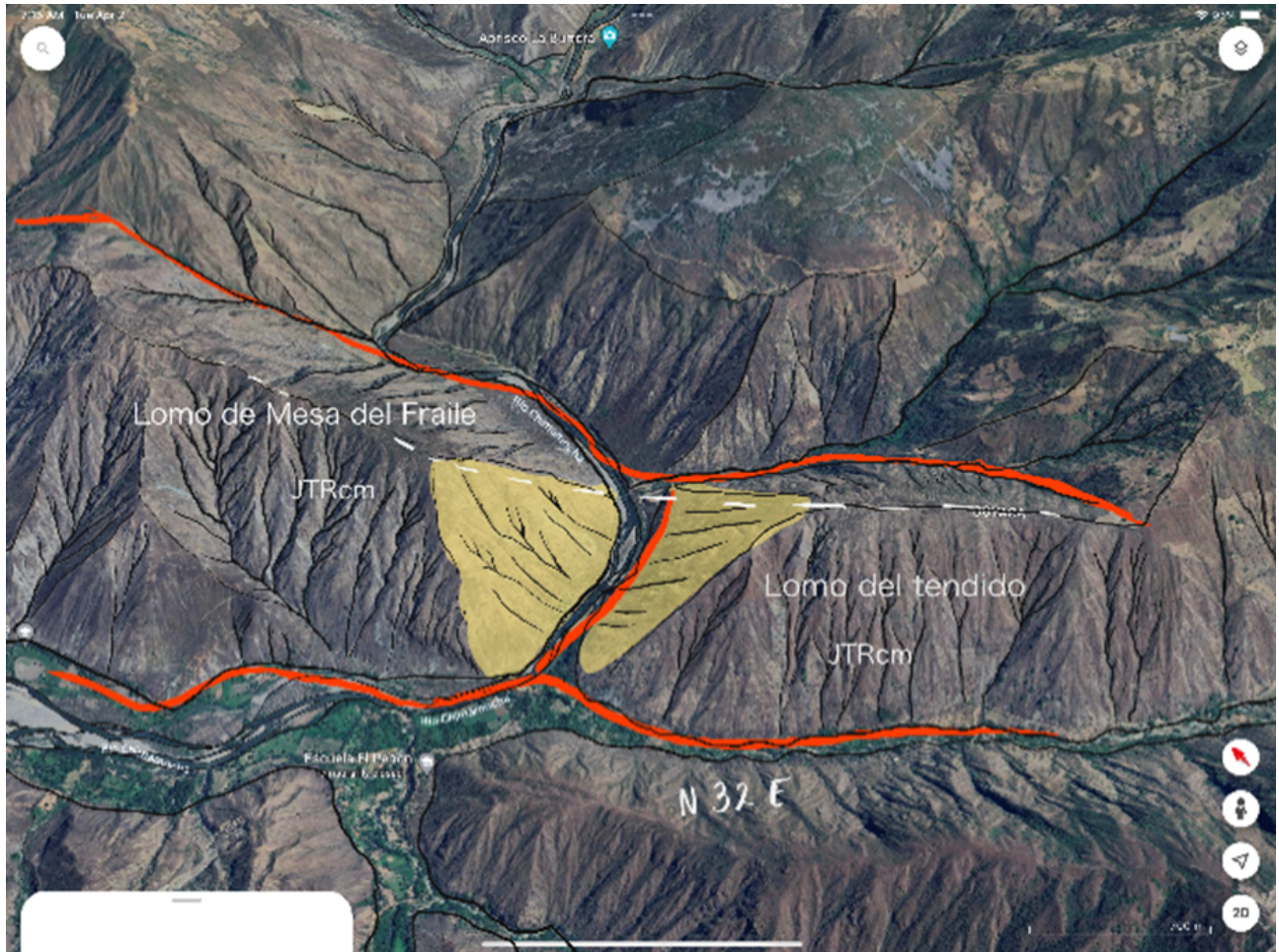


Depósitos coluviales en una geoforma aterrazada de origen fluvial.

3.2 Zona Capitanejo (parte ígneo-metamórfica)

Figura 4

Lomo de la Mesa del Fraile y lomo El Tendido



Corresponden a lomos de presión de la falla de Bucaramanga. Las rocas presentes en estos lomos son granitos de 190 millones de años (JTRcm).

3.3 Zona Cepitá

Las geoformas en esta área son resultado de la litología ígneo-metamórfica en un ambiente de alta erosión y la influencia de la tectónica.

Figura 5

Facetas triangulares en loma denudada conformada por depósitos cuaternarios en El Embudo evidencian el paso de la falla del río Guaca

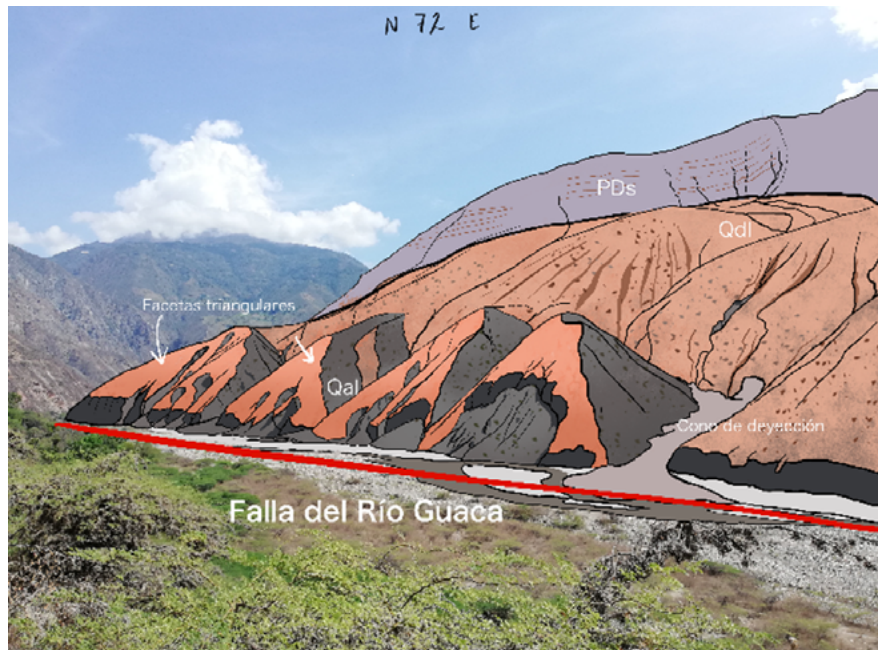


Figura 6

Abanico aluvial antiguo, evidencia del levantamiento ocasionado por la tectónica y una secuencia de abanicos más recientes

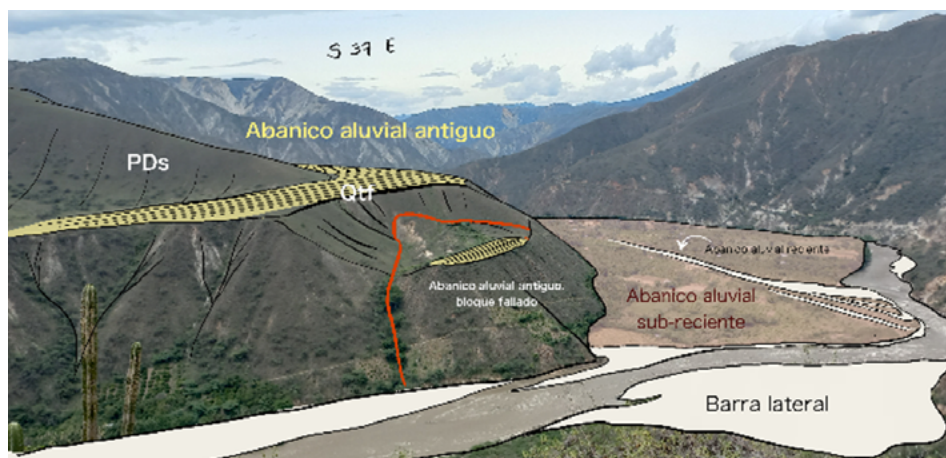


Figura 7

Desde el mirador Loma Colorada en Cepitá vista con orientación S30E en la que se aprecia la geomorfología fluvial y aluvial del río Chicamocha

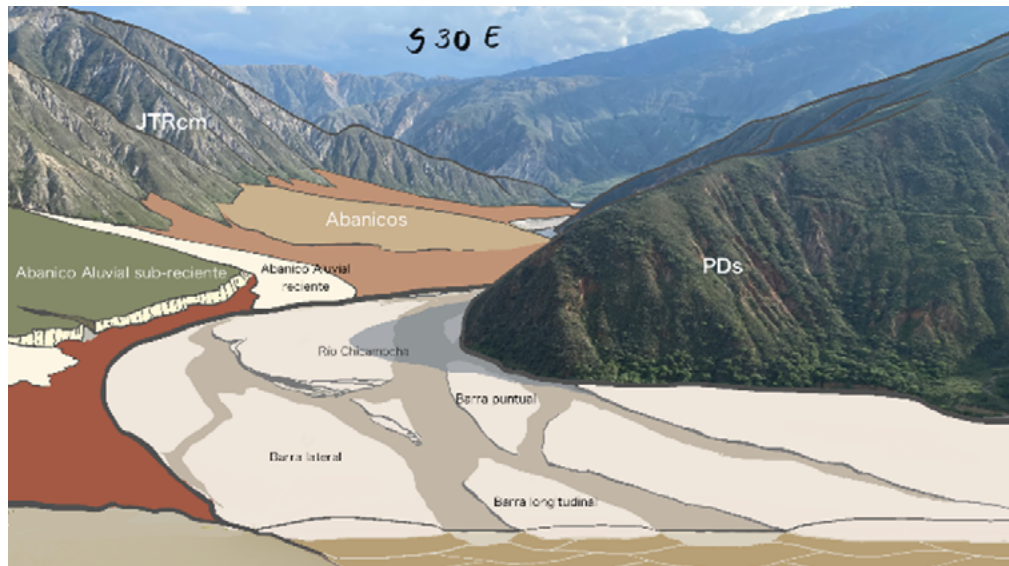


Figura 8

El lomo de obturación, producto del movimiento dextral de una falla antitética, desvía el curso natural del río Manco

3.4 Zona Pescadero

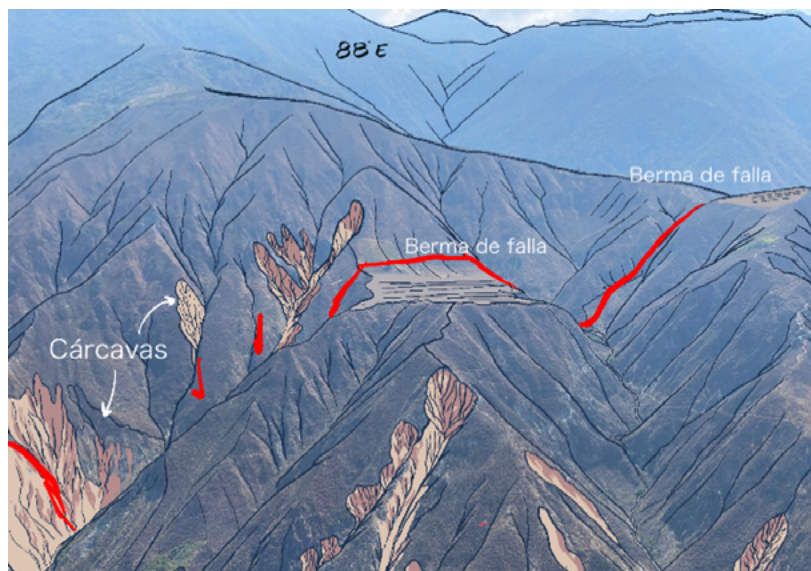
La complejidad de la zona de daño de la falla de Bucaramanga configura trazos y geoformas, tales como silletas, bermas, facetas triangulares, lomos, depresiones, ganchos de flexión y otros (Velandia, 2017).

El espolón faceteado que ahora es también un gancho de flexión se asocia a la actividad tectónica. El lomo de obturación (lomo de Pescadero) está bajo constante proceso de erosión por la acción de las fallas, por lo que crea un terreno de cárcavas y deslizamientos, también llamados badlands.



Figura 9

Geoformas estructurales, hombreras o bermas de falla y facetas triangulares en Umpalá

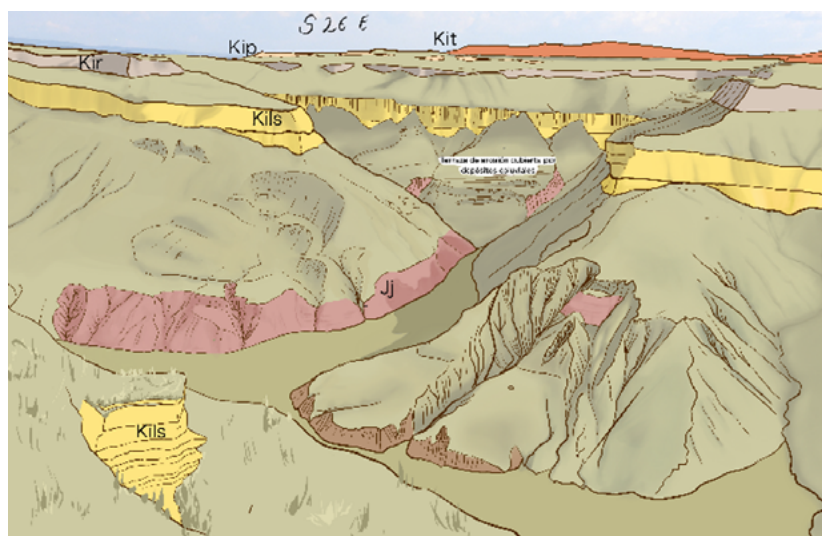


3.5 Zona de mesas y cuestras

El ambiente geomorfológico denudacional, fluvial y antrópico que se observa en la Mesa de los Santos y sus alrededores, donde aflora la secuencia sedimentaria del Jurásico-Cretácico (con edades desde 200 a 120 millones de años): Fm. Jordán, Fm. Los Santos, Fm. Rosa Blanca, Fm. Paja, Fm. Tablazo.

Figura 10

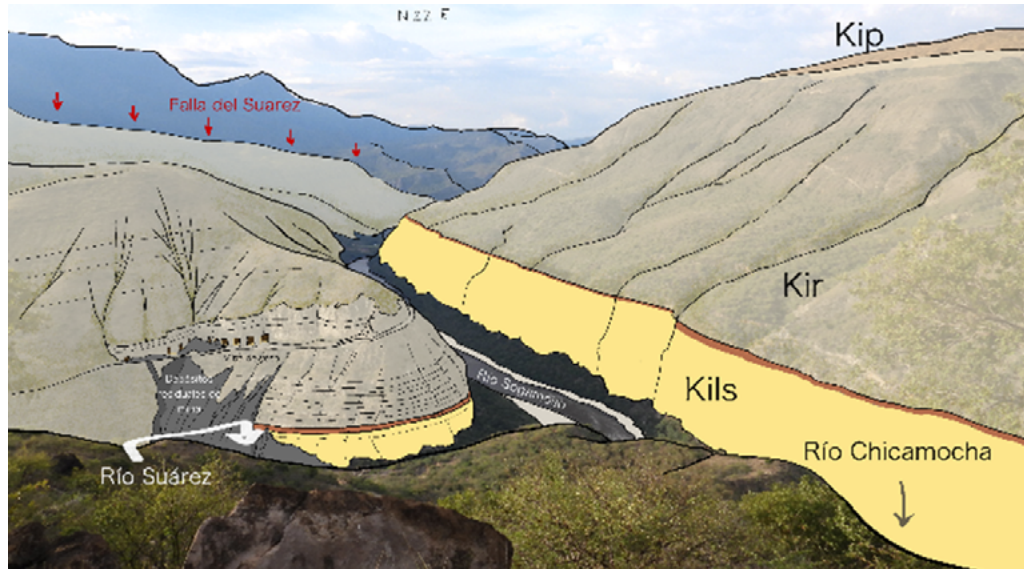
La geomorfología del paisaje



Se destaca la estratigrafía del Jurásico (200 Ma) al Cretácico (120 Ma): Fm. Jordán (Jj), Fm. Los Santos (Kils), Fm. Rosa Blanca (Kir), Fm. Paja (Kip), Fm. Tablazo (Kit).

Figura 11

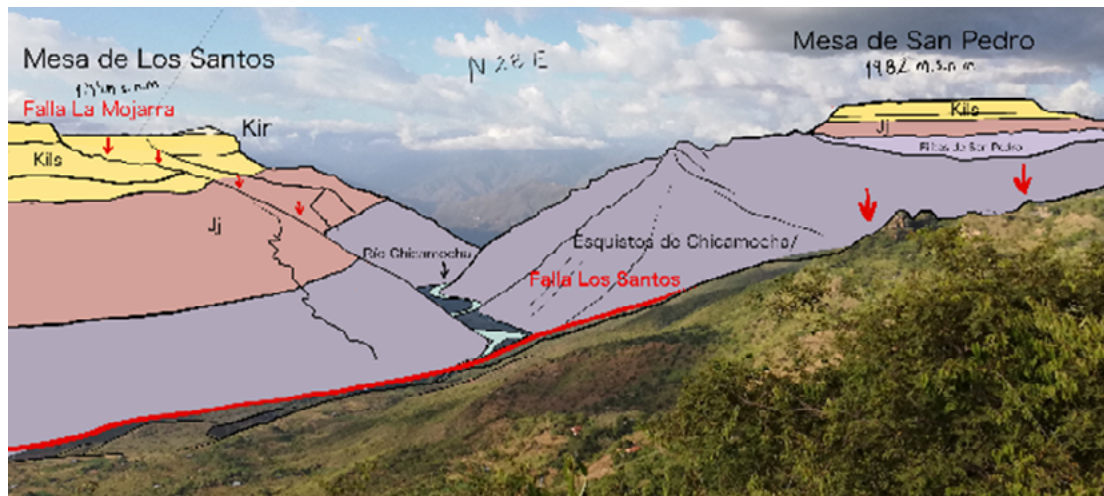
Las Juntas, lugar donde los ríos Chicamocha y Suárez confluyen para formar el río Sogamoso



En este paisaje también se observan túneles y material sobrante de minería.

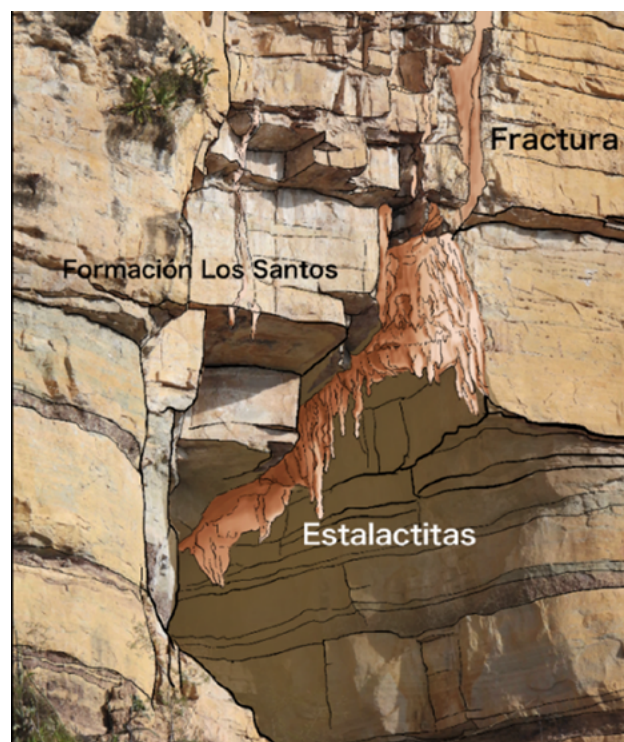
Figura 12

Ilustración de la Mesa de los Santos y la Mesa de San Pedro



Se destaca la diferencia en el espesor de las unidades sedimentarias y la presencia de las filitas de San Pedro (Mantilla et al. 2016).

Figura 13
Estalactitas en la formación Los Santos



El material carbonatado disuelto de la formación Rosa Blanca se transporta por medio de las fracturas y permite que se originen estas geoformas kársticas.

4. Discusión

La geomorfología no solo influye en las rocas y ríos, sino también en los seres vivos del planeta. Por ello, es necesario investigar más a fondo las tasas de erosión, la climatología y la biología para entender cómo la geología afecta la distribución de la fauna y flora en el Cañón del Chicamocha, que alberga varias especies endémicas del bosque seco tropical, uno de los ecosistemas más impactados por la actividad humana (Murphy y Lugo, 1986).

En este contexto, la divulgación científica es clave para conservar el patrimonio natural, y requiere la creación de materiales que sean fáciles de entender y enseñar, uno de los objetivos principales de este trabajo; de esta forma es posible conectar a las personas con la geología observable en los paisajes del Cañón del Chicamocha y generar un impacto en los conocimientos generales de la comunidad.

Para ello, se tomó en cuenta el glosario de términos geomorfológicos del Servicio Geológico Colombiano (2015) para clasificar y reconocer las geoformas. Sin embargo, se podría argumentar que el formato actual no cuenta con metodologías adecuadas para hacer accesible la información a todo el público, incluso a quienes estudian geología, geografía o ingenierías relacionadas, ya que las definiciones pueden ser redundantes o demasiado similares.

5. Conclusiones

Este trabajo se centra en el curso del río Chicamocha desde el sur, en el límite del departamento de Santander, hasta su confluencia con el río Suárez en Las Juntas, continuando por tres puntos en el río Sogamoso. Dentro del área de estudio se encuentra la falla de Bucaramanga y otras fallas importantes como Suárez, río Perchiquez, La Mojarra y Los Santos-Aratoca, entre otras. Además, se analiza la diversidad geológica de los cuerpos ígneos, sedimentarios y metamórficos, donde afloran rocas tan antiguas como el Neis de Bucaramanga y los esquistos del Silgará, en contacto con rocas sedimentarias del Cretácico, como en la Mesa de San Pedro. Entender el sistema de erosión y acumulación del Cañón del Chicamocha permite observar la dinámica de las estructuras que controlan la morfología a nivel regional.

Referencias

- Calderón, M. & Gil, J. (2023). Inventario del patrimonio geológico inmueble en el municipio de Cepitá (Santander). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Genge, M. J. (2020). Geological Field Sketches and Illustrations: A Practical Guide. Oxford University Press, USA.
- Mantilla, L. C., García, C. A., & Valencia, V. A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. Boletín de Geología, 38 (1): 33-50.
- Murphy, P. G., & Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. Annual review of ecology and systematics, 67-88.
- Servicio Geológico Colombiano (2015) Anexo A. Glosario de términos geomorfológicos. Propuesta Metodológica Sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Escala 1:100.000.
- Velandia, F. 2017. Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander-énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 222 p.

Frecuencia de diez infecciones de transmisión sexual en población con condición de vulnerabilidad del área metropolitana de Bucaramanga y Cúcuta

Brayan Fabián Mendoza Landinez

Microbiología y Bioanálisis, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
brayanfabian.m@gmail.com

Óscar Eduardo Daza Pardo

Microbiología y Bioanálisis, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
oscardaza9@gmail.com

María Fernanda García Chaparro

Microbiología y Bioanálisis, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
mariafernanda22gch@gmail.com

Alejandra Valentina Facenda Fuentes

Microbiología y Bioanálisis, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
Alejandrafacenda@gmail.com

Eliana Marcela Mora Guevara

Maestría en Ciencias Básicas Biomédicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
elianamorag7@gmail.com

Ivette Karina Freyle Roman

Maestría en Ciencias Básicas Biomédicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
Freyleroman@gmail.com

Ruth Aralí Martínez Vega

Docente. Universidad de Santander, Colombia.
rutharam28@gmail.com

Bladimiro Rincón Orozco

Docente Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
blrincon@uis.edu.co



Resumen

Este estudio tiene como objetivo establecer la frecuencia de 10 ITS en población vulnerable del área metropolitana de Bucaramanga (AMB) y área metropolitana de Cúcuta (AMC). Se realizó un estudio de corte transversal que incluyó población migrante con vocación de permanencia, migrante caminante y colombianos. Se incluyeron hombres, mujeres y personas con identidad de género diverso, sin afiliación al sistema de salud o con afiliación a través de un puntaje de Sisbén de pobreza extrema o pobreza moderada. Se realizó detección molecular. Se describieron las características sociodemográficas y frecuencias de infección entre tipo de población, sexo biológico y ciudad de captación. En los resultados obtenidos se encontró que la principal ITS encontrada es por *U. urealyticum/parvum* con una frecuencia de 52,2 % en la población en general, seguido de un 38,7 % con presencia de infección por *M. hominis* y un 14,9 % con *T. vaginalis*. Se obtuvieron diferencias significativas entre sexo biológico y ciudad de captación. La diferencia en la frecuencia de infección entre hombres y mujeres fue estadísticamente significativa para *U. urealyticum* y *M. hominis*. Los microorganismos VHS-1, *H. ducreyi* o *T. pallidum* no se identificaron en las muestras genitales analizadas. En general, en la población analizada, se concluye que existe una alta prevalencia de ITS, con más del 72 % de positividad para al menos uno de los microorganismos evaluados.

Palabras clave: ITS, *M. hominis*, *U. urealyticum*, población vulnerable, población migrante.

1. Introducción

Las infecciones de transmisión sexual son todas aquellas que se adquieren principalmente a través del intercambio de fluidos infectados o contacto con la piel durante las relaciones sexuales vaginales, anales u orales. Algunas pueden transmitirse por la sangre y hemoderivados, y otras pueden transmitirse de madre a hijo durante el embarazo, el parto y la lactancia (Wihlfahrt et al., 2023; WHO, 2021). En la actualidad, más de 30 microorganismos diferentes, incluidos bacterias, virus y parásitos, se transmiten por contacto sexual a través de las abrasiones microscópicas dentro de las membranas mucosas del pene, la vagina o cualquier otra superficie mucosa que permita que el patógeno logre causar la infección (García, 2023).

Entre los microorganismos más frecuentes que causan ITS están bacterias como *Chlamydia trachomatis* (*C. trachomatis*), *Neisseria gonorrhoeae* (*N. gonorrhoeae*), *Treponema pallidum* (*T. pallidum*), *Mycoplasma hominis* (*M. hominis*), *Mycoplasma genitalium* (*M. genitalium*), *Ureaplasma urealyticum* (*U. urealyticum*), *Haemophilus ducreyi* (*H. ducreyi*). Los patógenos virales más frecuentes son *Herpes simplex virus 1* y *2* (VHS-1 y VHS-2) y *Trichomonas vaginalis* (*T. vaginalis*) como ITS causada por parásitos (García, 2023).

Las ITS representan un problema de salud pública de escala mundial por ser una de las principales causas de enfermedad aguda e infertilidad en hombres, mujeres y niños, además de tener un gran impacto social y económico asociado con pérdida de productividad laboral, costos médicos y afectación de las relaciones interpersonales (Ministerio de Salud de Colombia, 2024).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que alrededor de un millón de personas contraen una ITS cada día, la mayoría de los casos con un curso asintomático. En el 2020, se notificaron cerca de 374 millones de casos nuevos de clamidiasis, gonorrea, sífilis y tricomoniasis, y más de 500 millones de personas presentaron infección genital por el virus de herpes simple (Organización Mundial de la Salud, 2024).

En Colombia, según informes del Ministerio de Salud y Protección Social, se registran cerca de 98.423 casos de ITS al año. En el 2009, se reportaron 7354 casos de sífilis en el país, con una prevalencia del 1,7 % en población gestante, superior al porcentaje establecido por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) como criterio base.

En el 2011 se registraron 2788 casos de infección gonocócica y 9766 casos de herpes genital. Aunque en otros países los casos de uretritis no gonocócica causada por *Chlamydia spp* son una de las principales ITS, en Colombia solo se reportan aproximadamente 1500 casos por año, lo que puede atribuirse a un subregistro de la información recolectada por las instituciones de salud (Ministerio de Salud de Colombia, 2024).

Entre los grupos poblacionales con las tasas más altas de ITS, se encuentran los adolescentes, trabajadores sexuales y la población LGBTQ+ (Organización Mundial de la Salud, 2024; Center for disease control and prevention, 2024). Algunos reportes han asociado la vulnerabilidad económica a conductas de riesgo, como el inicio sexual a temprana edad, poligamia y actividad sexual sin protección (Scheidell et al., 2018). Así mismo, este factor se ha correlacionado significativamente con las tasas de casos de clamidiosis y SIDA (Holtgrave, 2003).

Finalmente, el proceso de migración ha traído consigo mayor vulnerabilidad frente a problemas de salud sexual, esto debido al impacto socioeconómico que genera el desplazamiento, exposición a factores de riesgo conductuales y la baja accesibilidad a los sistemas de atención en salud, lo que dificulta el diagnóstico y tratamiento (Ghimire et al., 2019; Silva et al., 2023).

Múltiples estudios han revelado tasas más altas de conductas sexuales de riesgo en población migrante, como relaciones sexuales fuera del matrimonio, parejas sexuales simultáneas, participación en actividades sexuales sin protección con poblaciones de alto riesgo y el alto consumo de alcohol y drogas (11, 12, 13, 14).

A pesar de la magnitud de la problemática que representan las ITS, Colombia cuenta con poca información sobre el estado de salud sexual de las poblaciones vulnerables mencionadas anteriormente. A esto se suma la carencia de reportes epidemiológicos oficiales de Venezuela desde el 2016, por lo que las tasas de incidencia disponibles son estimaciones realizadas a partir de valores y proyecciones de población anterior a la oleada migratoria, que impiden tomar medidas de atención pertinentes (15).

Considerando lo anterior, este estudio pretende establecer la frecuencia de diez infecciones de transmisión sexual causadas por *Chlamydia trachomatis*, *Haemophilus ducreyi*, *Herpes simplex virus 1*, *Herpes simplex virus 2*, *Mycoplasma genitalium*, *Mycoplasma hominis*, *Neisseria gonorrhoeae*, *Treponema pallidum*, *Trichomonas vaginalis* and *Ureaplasma urealyticum/parvum*, en población vulnerable, incluidos migrantes con vocación de permanencia, migrantes caminante o colombianos sin afiliación al sistema de salud o con afiliación a través de un puntaje de Sisbén (Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de

Programas Sociales) de pobreza extrema (Grupo A) o pobreza moderada (Grupo B), en las áreas metropolitanas de las capitales de los departamentos de Santander y Norte de Santander.

2. Metodología

Se realizó un estudio de corte transversal, entre abril y agosto de 2024, en migrantes caminantes, migrantes con vocación de permanencia y colombianos residentes como condición de captación anidado en el proyecto de extensión “Programa detección y tratamiento de infecciones de transmisión sexual en población LGBTQ+, migrantes y población vulnerable del área metropolitana Cúcuta y Bucaramanga, y fortalecimiento técnico-científico para detección molecular de enfermedades de transmisión sexual en las secretarías de Salud de Bogotá, Santander y Norte de Santander”.

Se incluyeron hombres, mujeres y personas con identidad de género diverso, entre los 18 y 65 años, pertenecientes a uno de los grupos objetivo del estudio; se comprende como vulnerables a aquellos sin afiliación al sistema de salud o con afiliación a través de un puntaje de Sisbén de pobreza extrema (Grupo A) o pobreza moderada (Grupo B), localizados en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) y el Área Metropolitana de Cúcuta (AMC).

Se realizaron jornadas en diferentes centros de ayuda para población migrante y colombiana. A los participantes se les tomó muestra cervicovaginal o de orina, según correspondiese el sexo biológico. Los datos sociodemográficos y de salud sexual y reproductiva se tomaron de encuestas aplicadas a cada participante.

En el proyecto macro, con código 8053, desarrollado en la Universidad Industrial de Santander, se realizó la detección de los siguientes microorganismos causantes de ITS: *Virus Herpes Simple 1 y 2*, *Chlamydia trachomatis*, *Haemophilus ducreyi*, *Mycoplasma genitalium*, *Mycoplasma hominis*, *Neisseria gonorrhoeae*, *Treponema pallidum*, *Ureaplasma urealyticum/parvum* y *Trichomonas vaginalis*. Se utilizó el kit STD Direct Flow CHIP (Vitro Master Diagnóstica, España), cuya metodología consiste en la amplificación simultánea de ADN bacteriano, viral y protozooario mediante PCR multiplex en un solo paso, seguida de una hibridación sobre membrana con sondas de ADN específicas utilizando la tecnología DNA-Flow para plataformas HybriSpot.

Se describieron las características sociodemográficas utilizando medidas de tendencia central y dispersión para las variables cuantitativas; y frecuencias absolutas y relativas para las variables cualitativas. Las frecuencias de infección por ITS se compararon entre el AMB y el AMC, condición de captación (migrantes caminantes, migrantes con vocación de permanencia y colombianos residentes), así como sexo biológico; se utilizó la prueba exacta de Fisher.

3. Resultados

Los resultados del análisis de las características sociodemográficas se pueden observar en la tabla I. Se incluyeron un total de 395 participantes, 50 % en AMB (n = 200) y 49,5 % en AMC (n = 195). Los participantes tuvieron una mediana de edad de 35 años (RIQ:28-45), el 76,5 % eran de sexo femenino, y más de la mitad de la población eran venezolanos (tabla I).

Sobre las características relacionadas a la orientación sexual, el 1,8 % se consideró bisexual; el 2,5 %, homosexual; y 0,3 %, pansexual. La principal identidad de género fue cisgénero, con un 94,4 %. El 45,3 % de los participantes reportaron haber tenido más de 7 compañeros sexuales durante toda su vida, y el 37 % dice no haber usado el condón durante sus relaciones sexuales.

Del total de los participantes, se observó que el 72,5 % tuvo un resultado positivo para al menos una de las 7 ITS encontradas. La gráfica 1 representa el porcentaje de frecuencias de infección de los 10 microorganismos analizados en el total de la población evaluada. Se observó que *U. urealyticum* fue el principal patógeno identificado, con un 52,2 % de prevalencia, seguido de *M. hominis* con un 38,7 % y *T. vaginalis* con un 14,9 %. Las demás infecciones tuvieron una frecuencia inferior al 3 %.

Gráfica 1

Frecuencia de las 10 ITS en los participantes del estudio

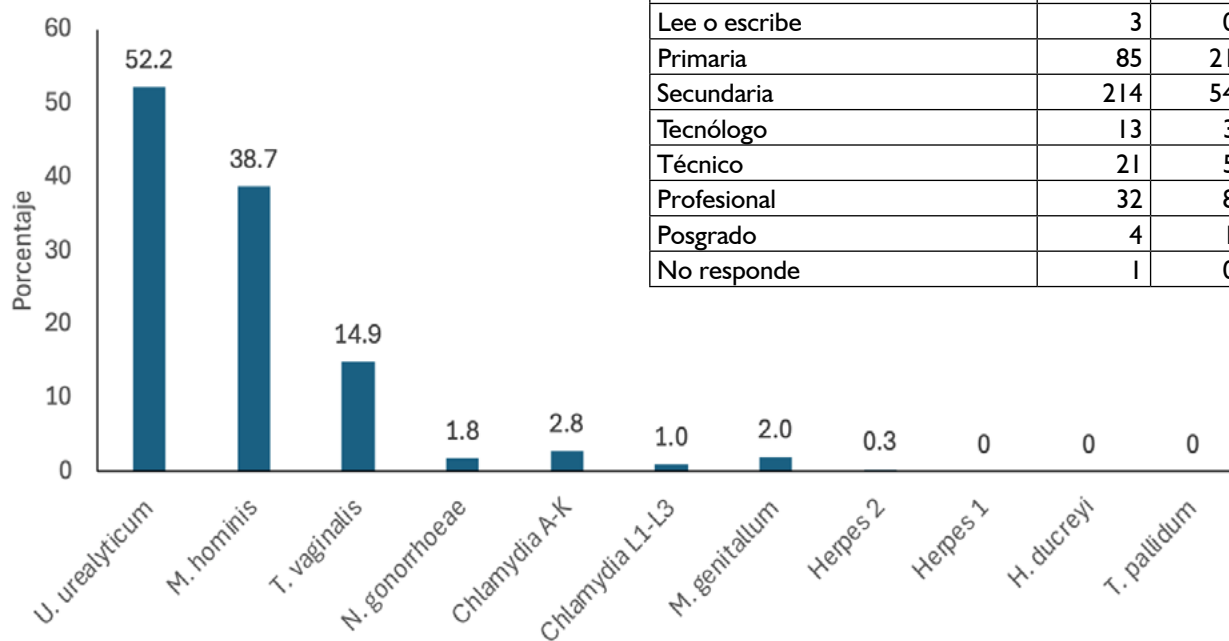


Tabla 1

Características demográficas de los participantes del programa

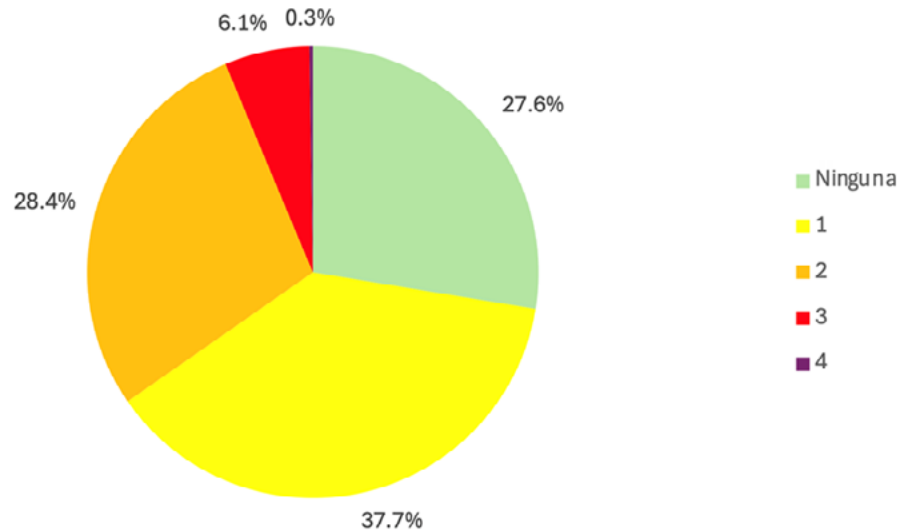
Característica	Mediana (RIQ) o media (DE)
Edad	35 (28-45)
Años de estudio (n=394)	8,7 (4,4)
Número de personas con las que viven/caminan (n=386)	4 (3-5)

Característica	n	%
Sexo femenino	302	76,5
En embarazo	10	3,4
Masculino	93	23,5
País de nacimiento		
Argentina	2	0,5
Colombia	147	37,2
El Salvador	1	0,3
Venezuela	244	61,8
No responde	1	0,3
Condición		
Caminante	15	3,8
Colombiano residente	147	37,2
Vocación de permanencia	233	59,0
Ciudad de captación		
Bucaramanga	200	50,6
Cúcuta	195	49,4
Nivel educativo		
Analfabeta	22	5,6
Lee o escribe	3	0,8
Primaria	85	21,5
Secundaria	214	54,2
Tecnólogo	13	3,3
Técnico	21	5,3
Profesional	32	8,1
Posgrado	4	1,0
No responde	1	0,3

La gráfica 2 representa las coinfecciones entre las ITS encontrada en general en los participantes del estudio. Se observó que el 34,8 % de los participantes tenían de 2 a 4 infecciones simultáneas, y de estas el mayor porcentaje (28,4 %) corresponde a 2 infecciones simultáneas.

Gráfica 2

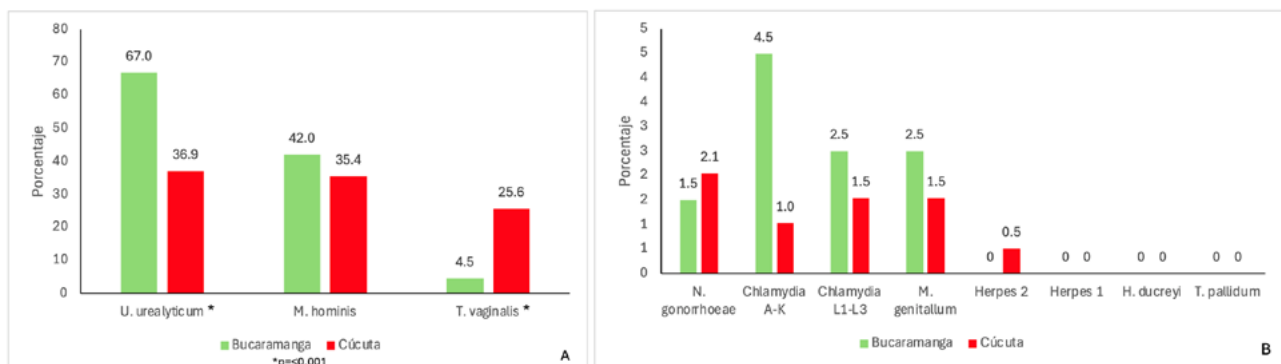
Coinfecciones de ITS en los participantes del programa (n = 395)



Dentro de las variables sociodemográficas incluidas en el estudio, se analizó la ciudad, la condición de captación (migrantes caminantes, migrantes con vocación de permanencia y colombianos residentes) y el sexo biológico, con el fin de determinar diferencias entre los resultados obtenidos entre estas variables y las diferentes ITS detectadas.

Gráfica 3

Frecuencia de las 10 ITS por ciudad (n = 395)



En la gráfica 3A se observan diferencias significativas entre AMB y AMC respecto a *U. urealyticum* (AMB: 67 % vs. AMC: 36,9 %, $p < 0,001$) y *T. vaginalis* (AMB: 4,5 % vs. AMC: 25,6 %, $p < 0,001$). Los demás patógenos se muestran en la gráfica 3B, en donde a pesar de haber un mayor porcentaje de infección por *C. trachomatis* A-K, *C. trachomatis* L1-L3 y *M. genitalium* en el AMB, y de *N. gonorrhoeae* en el AMC, estas diferencias no fueron significativas. Sin embargo, esto podría asociarse a que 47,7 % de la población incluida en el AMC refirió ser trabajadores sexuales; este es un factor de riesgo encontrado en otros estudios para adquirir una ITS.

En la tabla 2 se muestran las frecuencias de infección por condición de captación. Se observó diferencia significativa en la frecuencia de infección por *Mycoplasma hominis* y *Neisseria gonorrhoeae*; estos dos microorganismos fueron los más frecuentes en el grupo de migrantes caminantes.

En la gráfica 4A y 4B se presenta la frecuencia de infección entre hombres y mujeres incluidos en el estudio. Se observaron diferencias significativas solamente con los patógenos *U. urealyticum* (M: 57,3 % vs. H: 35,5 %, $p = < 0,001$), *M. hominis* (M: 42,1 % vs. H: 28 %, $p = 0,015$) y *M. genitalium* (M: 1 % vs. H: 5,4 %, $p = 0,020$).

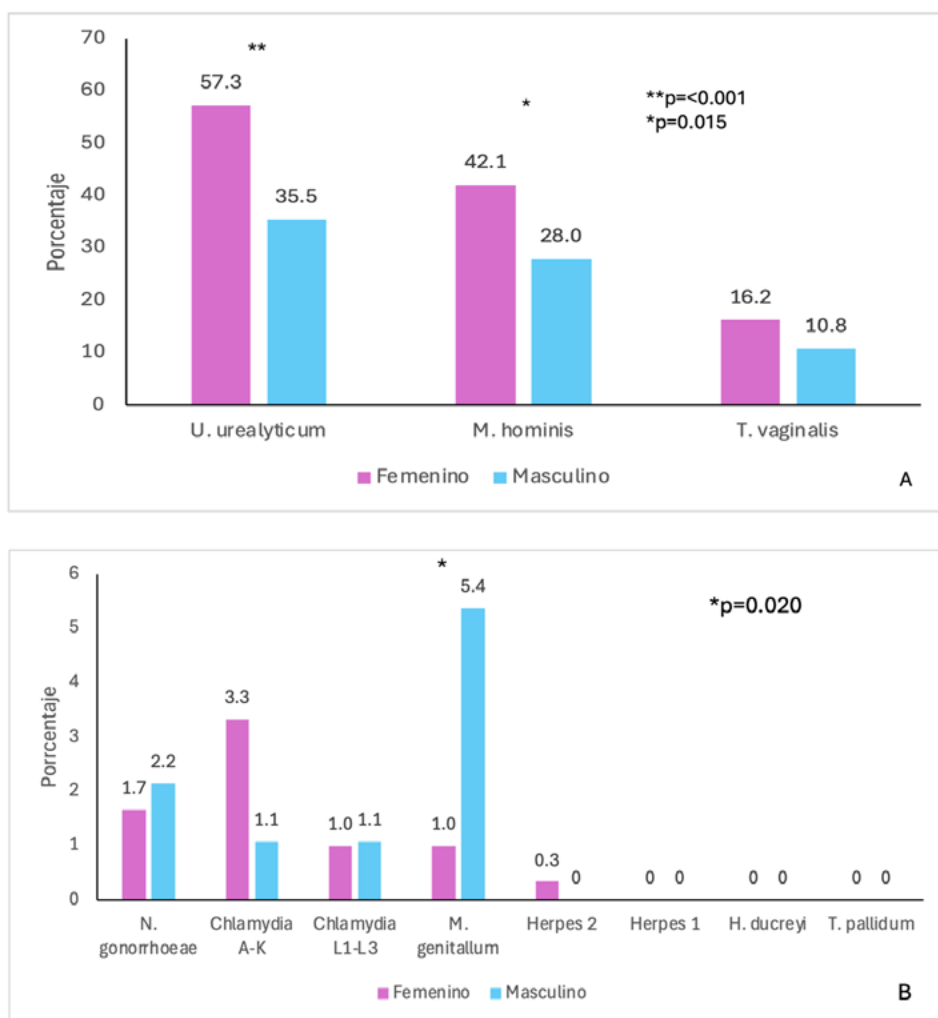
Tabla 2

Frecuencia de infección por condición de captación (n = 395)

Microorganismo	Caminante n = 15		Vocación de permanencia n = 233		Colombiano residente n = 147		Valor p
	n	%	n	%	n	%	
<i>Ureaplasma urealyticum</i>	10	66,7	126	54,1	70	47,6	0,251
<i>Mycoplasma hominis</i>	11	73,3	92	39,5	50	34,0	0,012
<i>Trichomonas vaginalis</i>	3	20,0	28	12,0	28	19,1	0,120
<i>Chlamydia A-K</i>	2	13,3	5	2,2	4	2,7	0,091
<i>Neisseria gonorrhoeae</i>	2	13,3	2	0,4	4	2,7	0,005
<i>M. genitalium</i>	1	6,7	4	1,7	3	2,0	0,312
<i>Chlamydia L1-L3</i>	0	0	2	0,9	2	1,4	0,694
Virus herpes simplex 2	0	0	1	0,4	0	0	1

Gráfica 4

Frecuencia de las 10 ITS por sexo



4. Discusión

Se estableció que las ITS con mayor frecuencia corresponden al género *Mycoplasma*; este es uno de los mayores problemas a nivel mundial durante la última década. *Mycoplasma hominis*, *Mycoplasma genitalium* y *Ureaplasma urealyticum* son microorganismos que se encuentran asociados a problemas reproductivos como la enfermedad pélvica inflamatoria en mujeres y la uretritis no gonocócica en hombres. Se han descrito

alteraciones vinculadas a la infección por estos microorganismos, en parámetros reproductivos como la morfología espermática, el índice de infertilidad y la subfertilidad en el hombre. Asimismo, la mayoría de las mujeres portadoras son asintomáticas.

Los síntomas están relacionados con infección cervical y uretral e incluyen flujo vaginal aumentado o alterado (<50 %), disuria o urgencia (30 %) y, ocasionalmente, sangrado intermenstrual

o poscoital. También se lo ha relacionado con cervicitis, endometritis y enfermedad pélvica inflamatoria (16). La mayoría de las personas portadoras de *Mycoplasma hominis* no presenta síntomas y solo un pequeño porcentaje experimenta secreciones de diversos tonos y olores, ardor y dolor al orinar e incluso sangrado (17). Las ITS por *Mycoplasma hominis*, *Mycoplasma genitalium* y *Ureaplasma urealyticum* suelen ser asintomáticas en la mayoría de la población; este es uno de los factores por los cuales no se diagnostica oportunamente y progresa a enfermedad.

Por consiguiente, la OMS recomienda que se realice un tratamiento sintomático de las ITS con la incorporación gradual de pruebas analíticas que ayuden a realizar el diagnóstico. En los lugares donde se disponga de pruebas moleculares de calidad garantizada, se recomienda basarse en sus resultados para tratar las ITS.

Además, es fundamental aplicar estrategias de detección de ITS en población con mayor riesgo de infección, como los trabajadores sexuales, los hombres que tienen relaciones sexuales con hombres, los adolescentes y las embarazadas (5).

5. Conclusiones

Se identificó una alta prevalencia de ITS en la población analizada, con más del 72 % de positividad para al menos 1 de los 7 microorganismos encontrados. También, se encontraron de 2 a 4 coinfecciones entre los microorganismos evaluados; las coinfecciones entre 2 microorganismos (28,4 %) fueron más frecuentes que entre 3 (6,1 %) y 4 (0,3 %) del total de las coinfecciones observadas.

Los microorganismos detectados con mayor frecuencia en la población del estudio fueron *U. urealyticum/parvum* con un 52,2 % de prevalencia, seguido de *M. hominis* con un 38,7 % y *T. vaginalis* con un 14,9 %. Además, las mujeres mostraron mayor frecuencia de infección por *U. urealyticum* y *M. hominis*, mientras que *M. genitalium* fue estadísticamente más frecuente en hombres.

Se observó mayor frecuencia de *U. urealyticum* en el AMB que en el AMC. Así como también, mayor frecuencia de *T. vaginalis* en el AMC que en el AMB, estas diferencias fueron estadísticamente significativas.

En cuanto a las frecuencias de infección por condición de captación, se observó una frecuencia significativamente mayor de *Mycoplasma hominis* y *Neisseria gonorrhoeae* en el grupo de migrantes caminantes.

La creciente prevalencia de ITS poco conocidas o buscadas, junto con la escasa disponibilidad de pruebas moleculares para su diagnóstico, subrayan la necesidad de mejorar las estrategias de detección y tratamiento de estas infecciones que pueden afectar significativamente la salud sexual y reproductiva de las poblaciones. Además, es de importancia prioritaria establecer programas de vigilancia continua que permitan monitorear no solamente al grupo migrante con vocación de permanencia, sino también a aquel grupo de caminantes que en su paso por el país puede impactar el estado de la salud pública en la región.

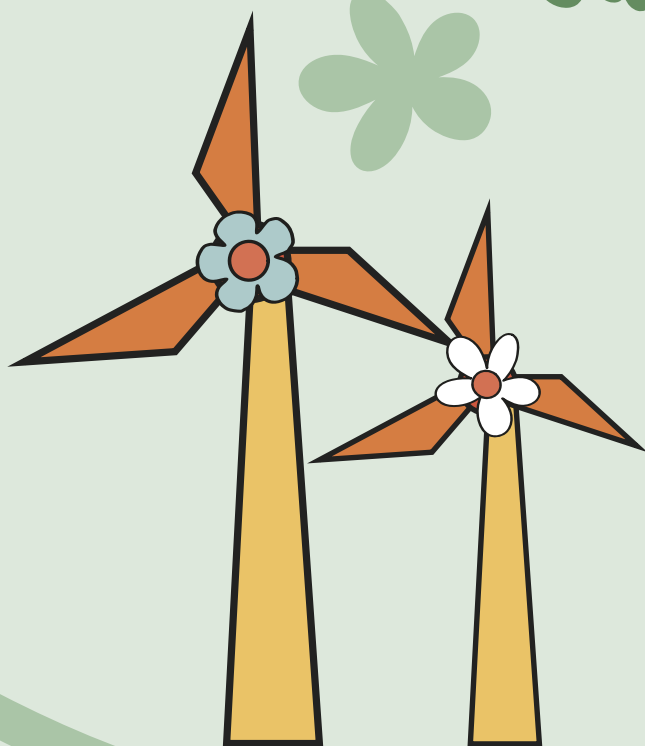
Referencias

- Wihlfahrt K, Günther V, Mendling W, Westermann A, Willer D, Gitas G, Ruchay Z, Maass N, Allahqoli L, Alkatout I. Sexually Transmitted Diseases-An Update and Overview of Current Research. *Diagnostics* (Basel, Switzerland). 2023 Sep;13(9):1656. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13091656>.
- World Health Organization. Cuatro infecciones de transmisión sexual curables: todo lo que necesitas saber [Internet]. Ginebra: WHO; 2021 [citado 2021 Oct 11]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/feature-stories/detail/four-curable-sexually-transmitted-infections---all-you-need-to-know#:~:text=Las%20ITS%20se%20transmiten%20generalmente,el%20embarazo%20y%20el%20parto>.
- García MR, Leslie SW, Wray AA. Sexually Transmitted Infections. [Actualizado el 30 de mayo de 2023]. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 ene-. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560808/>
- Ministerio de Salud de Colombia. Situación de las infecciones de transmisión sexual diferentes al VIH. Colombia 2009 - 2011. [Internet]. [Consultado 14 Abr 2024]. Disponible en: https://www.minsalud.gov.co/salud/Documents/observatorio_vih/documentos/monitoreo_evaluacion/1_vigilancia_salud_publica/a_situacion_epidemiologica/SITUACION%20DE%20LAS%20INFECCIONES%20DE%20TRANSMISION1.pdf
- Organización Mundial de la Salud. Infecciones de transmisión sexual. [Internet]. [Consultado 14 Abr 2024]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sexually-transmitted-infections-%28stis%29>
- Center for disease control and prevention. Sexually transmitted diseases. [Internet]. [Consultado 14 Abr 2024]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/msmhealth/STD.htm#:~:text=the%20United%20States-,Gay%2C%20bisexual%2C%20and%20other%20men%20who%20have%20sex%20with%20men,who%20have%20sex%20with%20men>
- Scheidell JD, Beau De Rochars VM, Séraphin MN, Hobbs MM, Morris JG, Célestin JP, et al. Socioeconomic vulnerability and sexually transmitted infection among pregnant Haitian women. *Sex Transm Dis* 2018;45:626–31. <https://doi.org/10.1097/olq.0000000000000861>.
- Holtgrave DR. Social capital, poverty, and income inequality as predictors of gonorrhoea, syphilis, chlamydia and AIDS case rates in the United States. *Sex Transm Infect* 2003;79:62–4. <https://doi.org/10.1136/sti.79.1.62>.
- Ghimire, S., Hallett, J., Gray, C., Lobo, R., & Crawford, G. (2019). What Works? Prevention and Control of Sexually Transmitted Infections and Blood-Borne Viruses in Migrants from Sub-Saharan Africa, Northeast Asia and Southeast Asia Living in High-Income Countries: A Systematic Review. *International journal of environmental research and public health*, 16(7), 1287. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071287>
- Silva, C.A., Silva G.R.C., Martins T.L.S., Moura W.É.A., Gomes D.O., Bandeira G.N., Carneiro M.A.S., Gonzalez R.I.C., Pacheco L.R., Zanchetta M.S., Lima J.O.R., Te-

- les S.A., Caetano K.A.A. (2023). Getting knowledge to provide care: prevalence and factors associated with Sexually Transmitted Infections in immigrants from Goiás. *Rev Esc Enferm USP*; 57(spe):e20230034. <https://doi.org/10.1590/1980-220X-REEUSP-2023-0034en>
- Tiruneh, K., Wasie, B. & Gonzalez, H. (2015). Sexual behavior and vulnerability to HIV infection among seasonal migrant laborers in Metema district, northwest Ethiopia: a cross-sectional study. *BMC Public Health* 15, 122. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1468-0>
- Uccella I, Petrelli A, Vescio MF, De Carolis S, Fazioli C, Pezzotti P, et al. HIV rapid testing in the framework of an STI prevention project on a cohort of vulnerable Italians and immigrants. *AIDS Care*. 2017;29(8):996–1002. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09540121.2017.1281876>. PubMed PMID: 28107787. 14.
- Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde de Departamento de Doenças de Condições Crônicas e Infecções Sexualmente Transmissíveis – DCCI. Boletim Epidemiológico de Hepatites Virais 2022 [Internet]. Brasília: Ministério da Saúde; 2022 [citado em 12 jul 2023]. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/especiais/2022/boletim-epidemiologico-de-hepatites-virais-2022-numero-especial15>.
- Luz PM, Osher B, Grinsztejn B, Maclean RL, Lousina E, Stern ME, et al. The cost-effectiveness of HIV pre-exposure prophylaxis in men who have sex with men and transgender women at high risk of HIV infection in Brazil. *J Int AIDS Soc*. 2018;21(3):e25096. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/jia2.25096>. PubMed PMID: 29603888
- Molina-Lubo OD. Efectos de la migración venezolana sobre la notificación de casos de VIH en Colombia. *Rev Univ Ind Santander Salud* 2022;54. <https://doi.org/10.18273/saluduis.54.e:22013>.
- Magdaleno, M. A., Irurtia, M. C., Casanova, N. B., Leonino, P., Pereyra, A., Di Bartolomeo, S., Balconi, S., & Montenegro, D. G. (2020). Prevalencia de la infección por *Mycoplasma genitalium* en mujeres embarazadas. <https://www.redalyc.org/journal/535/53564616006/>
- Magdaleno, M. A., Irurtia, M. C., Casanova, N. B., Leonino, P., Pereyra, A., Di Bartolomeo, S., Balconi, S., & Montenegro, D. G. (2020). Prevalencia de la infección por *Mycoplasma genitalium* en mujeres embarazadas. <https://www.redalyc.org/journal/535/53564616006/>

U24
fest

Transición
energética
justa



Desarrollo de un motor Stirling mejorado para generación de energía en zonas remotas y desérticas: solución para comunidades vulnerables en La Guajira, Colombia

Germán Orlando Romero Suárez

Estudiante Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
German2218069@correo.uis.edu.co

Martha Johanna Rueda Caballero

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
Martha2190330@correo.uis.edu.co

Daniel Enrique Peña León

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
Daniel2220378@correo.uis.edu.co

Daniel Eduardo García Olave

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial De Santander, Colombia
Daniel2220385@correo.uis.edu.co

Resumen

Este proyecto busca abordar la escasez de energía y agua en las comunidades indígenas wayuu de la región de La Guajira, Colombia, mediante un motor Stirling mejorado. Estas comunidades enfrentan dificultades debido a la falta de acceso al servicio de agua potable, lo que limita su desarrollo socioeconómico. El motor Stirling, un motor de combustión externa, es una solución prometedora para estas condiciones. El proyecto se enfoca en optimizar el diseño del motor Stirling para mejorar su eficiencia mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCM). La

metodología incluye análisis de requisitos energéticos e hídricos, diseño y construcción de un prototipo y pruebas tanto en laboratorio como en campo. Los resultados y la discusión están en desarrollo, pero el objetivo final es proporcionar una solución energética sostenible que mejore la calidad de vida y promueva el desarrollo en estas comunidades remotas.

Palabras clave: motor Stirling, energía solar, agua, materiales de cambio de fase (PCM), eficiencia energética.



1. Introducción

La Guajira, una región árida y desértica en el extremo norte de Colombia, alberga a comunidades indígenas como los wayuu, que enfrentan desafíos significativos relacionados con la escasez de recursos básicos, especialmente energía y agua. Estas comunidades remotas a menudo carecen de acceso a servicios básicos, lo que afecta su calidad de vida y limita sus oportunidades de desarrollo socioeconómico.

La falta de acceso a la energía eléctrica y al agua potable dificulta el acceso a la educación, la atención médica y otras necesidades básicas, lo que perpetúa el ciclo de pobreza y marginación en la región. En este contexto, el desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles es fundamental para abordar las necesidades urgentes de las comunidades indígenas en La Guajira. El motor Stirling emerge como una tecnología prometedora que puede contribuir significativamente a mejorar el acceso a la energía en estas áreas remotas y desérticas.

A diferencia de los motores convencionales, el motor Stirling opera con calor externo, lo que lo hace ideal para su uso en regiones con altas temperaturas y radiación solar intensa, como La Guajira. Sin embargo, para que el motor Stirling sea una solución efectiva en estas condiciones extremas, es necesario optimizar su diseño y funcionamiento.

La eficiencia energética y la confiabilidad del motor son aspectos críticos que deben mejorarse para garantizar un suministro constante y estable de energía eléctrica. Además, la integración de sistemas de enfriamiento mejorados es esencial para garantizar el rendimiento del motor, incluso en las condiciones más adversas.

En este contexto, este trabajo presenta un enfoque integral para mejorar el funcionamiento y la eficiencia del motor Stirling, con el objetivo de proporcionar una solución sostenible y asequible para las comunidades indígenas en La Guajira. Mediante la combinación de investigación científica y tecnológica, con un enfoque centrado en los PCM (materiales de cambio de fase), se busca desarrollar un motor Stirling mejorado que pueda generar energía de manera confiable y eficiente, incluso en las condiciones climáticas más extremas. Este enfoque no solo busca abordar la carencia de energía en la región, sino también contribuir al desarrollo socioeconómico y mejorar la calidad de vida de las comunidades indígenas en La Guajira.

2. Metodología

2.1 Análisis de requisitos y contexto local

Se realizará un análisis de los requisitos energéticos e hídricos de las comunidades indígenas wayuu en La Guajira. Esto incluirá la evaluación de las necesidades de consumo de energía para iluminación, comunicación, refrigeración y otros usos domésticos, así como la demanda de agua para consumo humano, agricultura y otros fines. Además, se consideraron las condiciones climáticas extremas de la región, como altas temperaturas y radiación solar intensa, para informar el diseño y la operación del motor Stirling.

2.2 Diseño y mejora del motor Stirling

Tanto la ingeniería conceptual como el diseño detallado del motor Stirling ya se encuentran en desarrollo. Se explorarán diversas estrategias para mejorar la eficiencia y confiabilidad del motor, incluida la optimización de los componentes mecánicos y térmicos, la selección de materiales avanzados y la implementación de tecnologías PCM. Se utilizarán herramientas de modelado y simulación para evaluar el rendimiento esperado del motor bajo diferentes condiciones de operación.

2.3 Construcción del prototipo

Basándose en el diseño elaborado, se procederá a la construcción de un prototipo del motor Stirling mejorado. Se utilizarán materiales y componentes de alta calidad, seleccionados cuidadosamente para garantizar la durabilidad y eficiencia del sistema en el entorno desértico de La Guajira. Se prestó especial atención a la integración de sistemas de enfriamiento efectivos PCM, para garantizar el funcionamiento óptimo del motor incluso en condiciones climáticas extremas.

2.4 Pruebas en laboratorio

Una vez construido el prototipo, se llevarán a cabo pruebas exhaustivas en condiciones controladas de laboratorio. Se medirá y registrará el rendimiento del motor en términos de eficiencia energética, capacidad de generación de energía y estabilidad operativa bajo diferentes cargas y condiciones de temperatura. Se realizarán los ajustes y modificaciones según sea necesario para optimizar el rendimiento del motor y garantizar su fiabilidad en condiciones reales.

2.5 Pruebas de campo y evaluación en situaciones reales

Una vez validado en laboratorio, el prototipo del motor Stirling mejorado se instalará en comunidades seleccionadas de La Guajira para su evaluación en condiciones reales de operación. Se llevará a cabo un monitoreo continuo del rendimiento del motor, registrando datos sobre la generación de energía, el consumo de combustible, la temperatura ambiente y otros parámetros relevantes. Se recopilarán comentarios y opiniones de los usuarios para evaluar la aceptación y utilidad del sistema en el contexto local.

2.6 Análisis de resultados y conclusiones

Finalmente, se analizarán los datos recopilados durante las pruebas de laboratorio y campo para evaluar el rendimiento y la eficacia del motor Stirling mejorado. Se extraerán conclusiones sobre la viabilidad y efectividad del sistema para abordar las necesidades energéticas e hídricas de las comunidades indígenas en La Guajira. Se identificarán áreas de mejora y se propondrán recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollos en este campo.

3. Resultados

3.1 Diseño conceptual

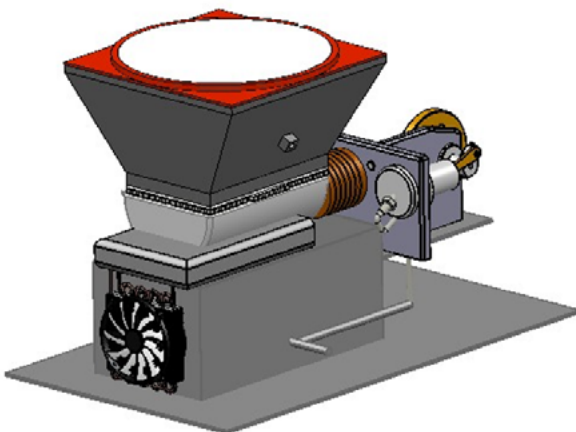
El diseño preliminar del motor Stirling parte de la teoría de Schmidt; esta teoría es un modelo analítico clásico que se utiliza para analizar y predecir el comportamiento de los motores Stirling. Este modelo fue desarrollado por Gustav Schmidt, en

1871, y es uno de los primeros intentos de proporcionar una comprensión matemática de los motores Stirling. La teoría de Schmidt se basa en varias simplificaciones y suposiciones que permiten derivar ecuaciones relativamente simples para describir el ciclo Stirling ideal. Se considera, por tanto, un modelo de primer orden.

El proyecto parte desde una de las tres principales configuraciones de motor Stirling, la configuración Gamma, donde el pistón de potencia y el desplazador están en cilindros separados, lo que simplifica el diseño y reduce algunos problemas mecánicos.

Debido a la naturaleza del motor Stirling, como un motor de combustión externa, su eficiencia está directamente relacionada con el diferencial de temperatura entre sus cilindros. Por lo tanto, el desarrollo de una mejora busca aumentar la brecha de temperaturas. La figura 1 presenta el resultado del diseño conceptual del motor Stirling mejorado.

Figura 1
Diseño conceptual



El sistema propuesto consiste en un captador solar mediante un disco de Fresnel, para captar la energía solar en un contenedor con un material de cambio de fase PCM, en este caso una parafina.

La energía en forma de calor tendrá tres caminos, uno de ellos es directamente el cilindro caliente del motor Stirling.

Su segundo destino es un sistema de absorción, donde se parte en el generador que contiene una solución refrigerante agua; en este generador se busca evaporar el refrigerante con el calor del PCM, posteriormente condensar este refrigerante que necesita pasar por un rectificador para verificar que no contiene moléculas de agua.

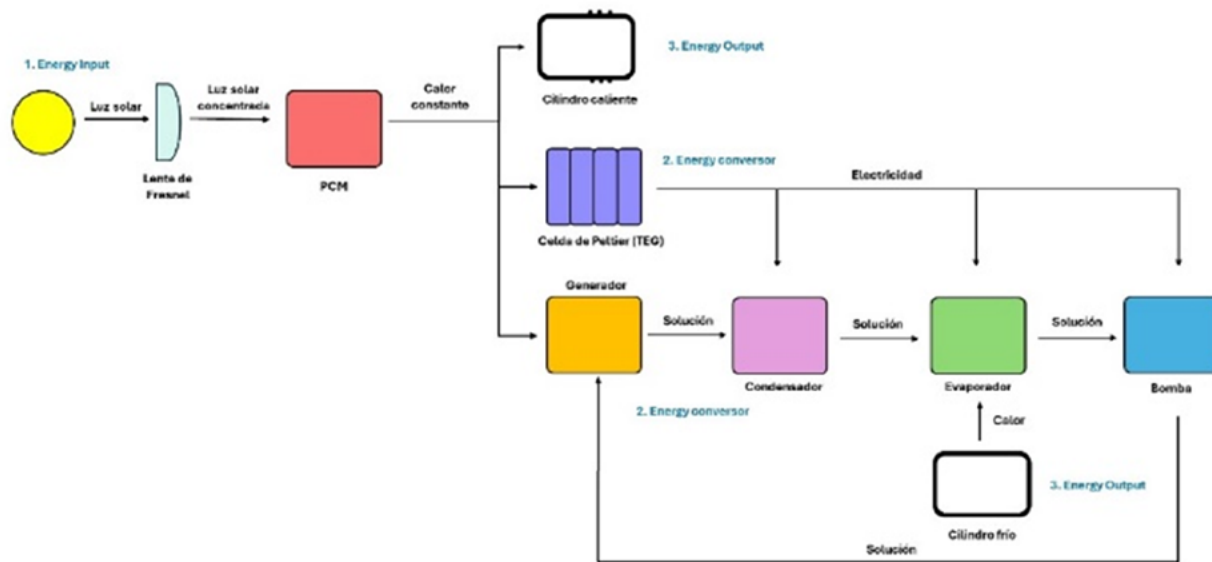
Este refrigerante nuevamente en estado líquido pasará por una fase de evaporación donde la fuente será el cilindro frío del motor Stirling, esto con el fin de eliminar calor de este componente del motor y aumentar la brecha de temperatura.

Como está en forma gaseosa, se necesita un absorbedor con una bomba para generar nuevamente una solución y desplazarla a la zona del generador.

Sin embargo, elementos como el condensador, la bomba e incluso el evaporador requieren de electricidad para su correcto funcionamiento, por tanto, el tercer camino del calor almacenado corresponde a un sistema de celdas Peltier, las cuales mediante el efecto Seebeck, que es un efecto termoeléctrico, generan electricidad mediante un diferencial de temperatura. La figura 2 nos presenta un esquema del diseño conceptual del presente proyecto.

Figura 2

Esquema del diseño conceptual



3.2 Diseño a detalle del motor Stirling

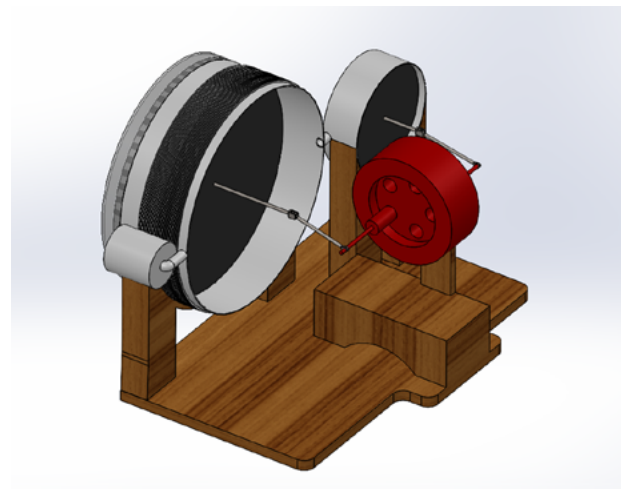
Inicialmente, se plantea el diseño y construcción de un prototipo de motor Stirling, con el fin de comparar los valores teóricos y experimentales de su eficiencia, y además dar prueba del sistema mejorado de absorción con PCM.

Para el diseño a detalle del prototipo se ha partido de dimensiones tomadas a criterio propio, y mediante la teoría de Schmidt. La figura 3 presenta el modelado CAD del primer prototipo de motor Stirling Gamma.

Mediante el cálculo de la eficiencia ideal de Carnot, se obtiene una eficiencia del 20 % (asumiendo un delta de temperatura de 75 grados centígrados)

Figura 3

Diseño motor Stirling Gamma



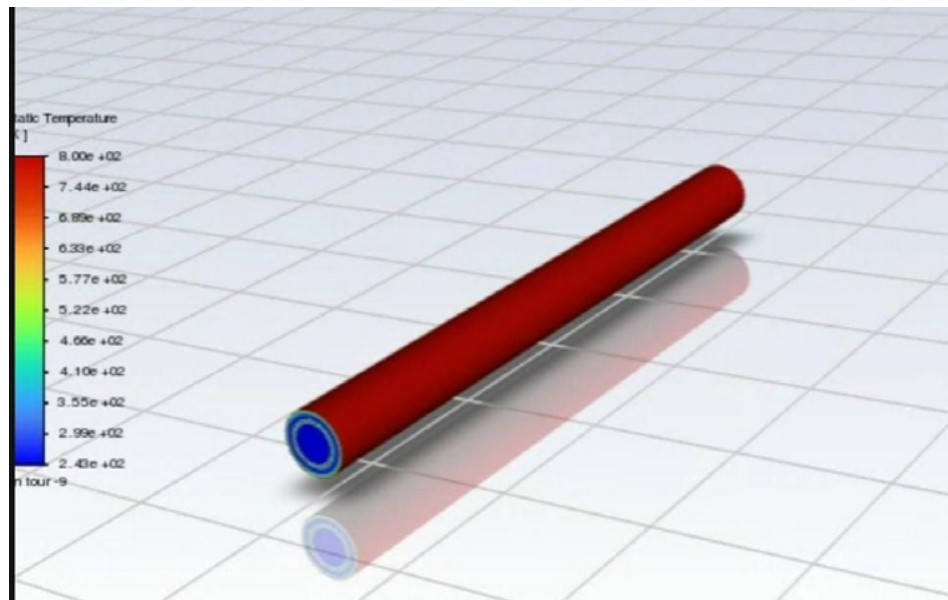
3.3 Estudio de los materiales de cambio de fase PCM

Para el estudio de la posible eficiencia mediante la aplicación de materiales de cambio de fase PCM, se inician simulaciones aplicando estos materiales en tubos de calor, mediante el *software* ANSYS versión estudiantil. La figura 4 presenta el diseño utilizado, que cuenta con dos tubos concéntricos; en el espacio entre los dos tubos concéntricos, de un material conductor, se encuentra el mate-

rial de cambio de fase, en este caso, una parafina que se funde a 25 °C. Por el interior del tubo interior circula aire, que se busca calentar, y la parte externa del tubo mayor se encuentra expuesta a la radiación solar.

Aunque no se han cuantificado los resultados en función de eficiencias, se encuentran mejorías en la transferencia de calor al aire interior, lo que se traduce en un aumento de la temperatura de salida en el tubo de calor.

Figura 4
Simulación PCM



4. Discusión

Es necesario seleccionar los materiales adecuados para cada parte del proyecto, desde el tanque de almacenamiento de PCM, donde es necesario disminuir la pérdida de calor por conducción al recipiente y con ello la convección natural con el ambiente.

En el caso del motor Stirling, no es un motor escalable linealmente, por lo que es necesario una revisión más profunda de la literatura para generar un diseño lo más eficiente posible.

Para la construcción del prototipo y del modelo final, es fundamental el acceso a herramientas de mecanizado, para evitar pérdidas de presión dentro de los cilindros, y pérdidas de energía por fricción.

5. Conclusiones

En desarrollo.

Referencias

- Alemam, A., Lopez Ferber, N., Eveloy, V., Martins, M., Malm, T., Chiesa, M., & Calvet, N. (2024). Experimental demonstration of a dispatchable power-to-power high temperature latent heat storage system. *Journal of Energy Storage*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111241>
- Al-Nimr, M., Khashan, S. A., & Al-Oqla, H. (2023). Novel techniques to enhance the performance of Stirling engines integrated with solar systems. *Renewable Energy*, 202, 894–906. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.086>
- Andraka, C. E. (2014). Dish Stirling advanced latent storage feasibility. *Energy Procedia*, 49, 684– 693. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.074>
- Andraka, C. E., Kruizenga, A. M., Hernandez-Sanchez, B. A., & Coker, E. N. (2015). Metallic Phase Change Material Thermal Storage for Dish Stirling. In Z. Wang (Ed.), *Energy Procedia* (Vol. 69, pp. 726–736). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.083>
- Babaelahi, M., & Jafari, H. (2020). Economic and exergetic evaluation of solar-powered combined LNG-burned micro gas turbine and Stirling engine. *International Journal of Exergy*, 32(4), 356–372. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2020.108946>
- Backhaus, S., & Swift, G. W. (2001). Fabrication and use of parallel plate regenerators in thermoacoustic engines. *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1, 453–458. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0012282102&partnerID=40&md5=03c3070f050830d52ee2531dda0fd941>
- Cárdenas, B., & León, N. (2014). Latent heat based high temperature solar thermal energy storage for power generation. In A. E. Lentz, A. T. No. 141 P. 3 Asociacion Nacional de Energia Solar (ANES), D. Renne, & Wiesenstralstr. 50 International Solar Energy Society (ISES) Freiburg (Eds.), *Energy Procedia* (Vol. 57, pp. 580–589). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.212>
- Kee, Z., Pye, J., & Coventry, J. (2020). System level analysis of a sodium boiler receiver and PCM storage CSP plant using solartherm. In C. Richter (Ed.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2303). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0029494>
- Lacy, D. E., Coles-Hamilton, C., & Juhasz, A. (1987). SELECTION OF HIGH TEMPERATURE THERMAL ENERGY STORAGE MATERIALS FOR ADVANCED SOLAR DYNAMIC SPACE POWER SYSTEMS. In NASA Technical Memorandum. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0023560251&partnerID=40&md5=3e33a9adf32c8548d1132e6692821dbc>
- Law, R., Reay, D. A., Mustaffar, A., McGlen, R. J., Underwood, C., & Ng, B. (2018). Experimental investigation into the feasibility of using a variable conductance heat pipe for controlled heat release from a phase-change material thermal

- store. *Thermal Science and Engineering Progress*, 7, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.05.007> Li,
- B., Guo, W., Liu, X., Zhang, Y., & Caneparo, L. (2022). The Third Solar Decathlon China Buildings for Achieving Carbon Neutrality. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/buildings12081094>
- Milian, Y. E., Ushak, S., Cabeza, L. F., & Grageda, M. (2020). Advances in the development of latent heat storage materials based on inorganic lithium salts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110344>
- Qiu, S., Galbraith, R., & White, M. (2013). Phase change material thermal energy storage system design and optimization. ASME 2013 7th Int. Conf. on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conf. and the ASME 2013 11th Int. Conf. on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, ES 2013. <https://doi.org/10.1115/ES2013-18335> Qiu,
- S., Solomon, L., & Rinker, G. (2017). Development of an integrated thermal energy storage and free-piston stirling generator for a concentrating solar power system. *Energies*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/en10091361>
- Shabgard, H., Faghri, A., Bergman, T. L., & Andraka, C. E. (2013). Numerical simulation of heat pipeassisted latent heat thermal energy storage unit for dish-stirling systems. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 6 B. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-65487>
- Shabgard, H., Faghri, A., Bergman, T. L., & Andraka, C. E. (2014). Numerical Simulation of Heat PipeAssisted Latent Heat Thermal Energy Storage Unit for Dish-Stirling Systems. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 136(2). <https://doi.org/10.1115/1.4025973>
- Song, H.-J., Zhang, W., Li, Y.-Q., Yang, Z.-W., & Ming, A.-B. (2017). Exergy analysis and parameter optimization of heat pipe receiver with integrated latent heat thermal energy storage for space station in charging process. *Applied Thermal Engineering*, 119, 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermal-eng.2017.03.080>
- Yadav, V. K., Kumar, A., & Jaiswal, R. (2022). Development of Heat Storage Device Assisted with Heat Pipe. In L. M. Das, A. Sharma, F. Y. Hagos, & S. Tiwari (Eds.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 103–112). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3428-4_

Diseño conceptual de una planta piloto para la demostración de la generación eléctrica a partir de la pirólisis de residuos plásticos

Juan Manuel Mogollón González

Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
juan2200682@correo.uis.edu.co

Derly Tatiana Méndez Hernández

Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
derly2201099@correo.uis.edu.co

Giovanni Morales Medina

Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
gmorales@uis.edu.co

Resumen

El objetivo de esta investigación es desarrollar un diseño conceptual de una planta piloto para la generación de electricidad mediante la pirólisis de residuos plásticos. La metodología incluyó una revisión de la literatura para recopilar datos sobre el proceso de pirólisis y los tipos de plásticos adecuados para su conversión. Se analizaron parámetros clave, como la composición, rendimiento y condiciones operativas, con el fin de definir el problema de diseño y establecer los criterios de operación para la planta piloto. Los resultados indicaron que el proceso de pirólisis seleccionado utiliza una combinación de un reactor de tornillo y lecho fluidizado, y permite convertir de manera efectiva una mezcla de residuos plásticos en combustibles líquidos (40 %) y gaseosos (42

%). La energía estimada, generada a partir del procesamiento de 2,5 kg/h de residuos plásticos, es suficiente para satisfacer la demanda energética diaria de aproximadamente 10 hogares (6,08 kWh/h). El estudio concluye que la planta piloto propuesta no solo aborda el desafío ambiental que representan los residuos plásticos, sino que también contribuye a la generación de energía, por lo que fomenta prácticas sostenibles. La adaptabilidad de esta tecnología a diferentes contextos geográficos, por su versatilidad, aumenta su potencial para ser implementada en regiones con acceso limitado a la energía.

Palabras clave: pirolisis, plásticos, diseño conceptual, alternativas de solución.

1. Introducción

Los países desarrollados han propuesto una transición energética hacia un escenario de cero emisiones, lo que ha motivado la aplicación de tecnologías de conversión de combustibles alternativos (International Energy Agency, 2023). Una de estas tecnologías es la pirólisis, la cual puede transformar material plástico en combustibles como gasolina y diésel. La pirólisis se presenta como una alternativa para la gran cantidad de desechos plásticos generados anualmente; en 2019, la producción mundial de plásticos fue de 480 MMt (Ferree et al., 2023), de las cuales 6,1 t fueron aportadas por Colombia (Gutiérrez, 2015). En este contexto, una planta piloto, que contemple tanto la investigación como la demostración de la tecnología de pirólisis de residuos plásticos, correspondería a un apoyo a la transición energética establecida también por el gobierno nacional.

La pirólisis, si bien es un proceso que permite realizar la conversión de residuos plásticos en combustibles, presenta desafíos a nivel de operación. Entre estos desafíos se pueden encontrar: A) la ineficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el material por tratar; B) el elevado consumo de energía, debido a que requiere de altas temperaturas; y C) la baja tasa de transferencia de calor dada por los reactores, lo que implica a un control complejo de las condiciones operativas (Kintek, 2022). Así mismo, requiere de la incorporación de métodos de purificación eficaces para el flujo de productos mezclados resultante de la operación y de la adopción de medidas para el buen manejo de residuos orgánicos volátiles y partículas. Según lo anterior, se presenta la necesidad de llevar a cabo investigaciones adicionales que definan las condiciones operacionales (Ángel et al., 2023) y de diseño en la pirólisis, que permitan abordar los desafíos y obtener un proceso más eficiente.

Por consiguiente, en el presente documento se propone el desarrollo de un diseño conceptual de una planta piloto de pirólisis de residuos plásticos como alternativa a la producción de combustibles.

2. Metodología

Se realizó búsqueda básica de información respecto al proceso de pirólisis, orientado a tipos de plásticos utilizados en la industria; se utilizaron las palabras clave “pirólisis”, “residuos plásticos” y “combustibles”. Se utilizaron las bases de datos documentales de la Universidad Industrial de Santander y los buscadores de información como SCOPUS y Web of Science.

Luego, se filtró y se seleccionó, de la información recopilada, un rango de plásticos para la operación de la planta piloto, de acuerdo con las características de los plásticos, tales como: composición, uso a nivel nacional, rendimientos de pirólisis, hoja de seguridad, facilidad de reciclaje, capacidad calorífica, entre otros. Se analizó la información recopilada y se seleccionaron los parámetros operativos acorde con el problema de diseño.

Con esta información, se definió el problema de diseño asociado a los objetivos del proyecto, mediante la selección del tamaño, producción, recurso de materia prima, calidad de los productos, rendimiento, catalizador y sistema reactivo, para un sistema de producción continuo. Mediante esta información se plantearon las alternativas de solución al diseño.

Finalmente, se caracterizaron y se evaluaron los criterios de selección de cada alternativa, mediante rangos de rendimientos, consumos energéticos, normas de seguridad industrial y potencial económico, donde se seleccionó la mejor alternativa al problema de diseño bajo los criterios establecidos.

3. Resultados

Revisión de literatura

A través de la revisión de literatura se obtuvieron datos de rendimientos, conversiones y con-

diciones de operación para el proceso de pirólisis con diferentes tipos de plásticos; la información se recopiló en la tabla 1. La tabla 1 muestra la información recopilada para múltiples tipos de plásticos con las condiciones esenciales que se deben saber para lograr realizar su tratamiento: temperatura, presión, conversión y selectividad.

Tabla 1

Condiciones de operación del proceso de pirólisis con diferentes tipos de plástico

Plástico	T operación [°C]	P operación [atm]	Conversión % p/p	Rendimiento sin catalizador %p/p	Rendimiento con catalizador %p/p	Atm. Inerte	Referencias
PE	250-760 Óptimo 530	I	90-95	83,7-92,3	88,8	N ₂ o Ar	(Camacho Flórez y Arciniegas Hernández, 2024)(Xayachak et al., 2022a)(Miandad et al., 2019)(Kassargy et al., 2018)
PP	200-500 Óptimo 370	I, pero varía en el proceso	95-98	83,7-88,8	91,7	N ₂	(Xayachak et al., 2022b)(Miandad et al., 2019)(Kassargy et al., 2018)(Frączak et al., 2021)
PVC	200-400	I	80-90	28,3-31,7	59,3-64,38	N ₂	(Zevenhoven et al., 2002)(Tang et al., 2003)(Frączak et al., 2021)
PS	300-475 Óptimo 450	I, pero varía en el proceso	95-98	26,3-99,7	52,0	N ₂	(Miandad et al., 2019)(Miandad et al., 2016)(Frączak et al., 2021)
PET	300-700 Óptimo 440	I	45	9,1	1,1-5,3 36,1	N ₂	(Buekens, 2006)(Dzięcioł y Trzeszczyński, 2000)(Williams y Williams, 1999)(López et al., 2011)

Tabla 2

Alternativas de solución al problema de diseño

Retratamiento	Sistema reactivo	Postratamiento gas de síntesis		Recirculación de N2
		Separación residuos sólidos	Recuperación de líquidos	
Reducción de tamaño (trituration)	Reactor de lecho fluidizado	Filtro	Torre de destilación	Sí
	Reactor de tornillo rotatorio	Ciclón		
Reducción de tamaño (trituration), secado y lavado	Sistemas de reactores de tornillo rotatorio y lecho fluidizado	EPs (precipitador electrostático)	Separación Flash en serie	No
		Separadores de impacto		

Nota: la tabla 2 presenta alternativas del proceso para cada una de sus etapas, pretratamientos, sistema reactivo y pos-tratamientos, además de plantear la opción de recircular materia prima fundamental para el proceso.

De las alternativas presentadas (tabla 2), se eligió la trituración como único equipo para el pretratamiento del material plástico de la planta. Mientras que, para el sistema reactivo, se seleccionó el sistema de dos reactores (tornillo rotatorio y lecho fluidizado) que pueden operar independientes o el reactor de lecho fluidizado como lecho catalítico de la corriente de salida de reactor de tornillo. Por otra parte, para el postratamiento de los sólidos fue necesario desarrollar una tabla independiente para identificar las ventajas de cada proceso, ya que no se tenía claridad al momento de su selección, por lo que en la tabla 3 se

compararon las características más importantes al realizar la separación. De ello se obtuvo que el filtro es la opción más acorde de acuerdo con las necesidades de diseño.

Por último, se escogió la recirculación de nitrógeno al sistema. Se plantea una estructura de reciclo y purga para minimizar los altos costos de su compra, ya que, al operar el reactor de lecho fluidizado, se necesita alimentar nitrógeno en relación 2:1 a la corriente de plásticos. Además, que al recircular la corriente gaseosa no se generaría inconvenientes en la cinética de reacción.

Tabla 3
Alternativas de separación de sólidos

Equipo	Caída de presión (bar/kPa)	Flujo de operación (m ³ /h)	Costo (USD)	Eficiencia de separación (%)	Tamaño de partícula separado (μm)	Mantenimiento	Referencia
Filtro	0,5 a 5 bar	5 a 100	\$5000 a \$50.000	90 % a 99 %	0,1 a > 100	Alto	(Lee et al., 2005)
Ciclón	0,5 a 3,0 kPa	1 a 40.000	\$500 a \$10.000	70 % a 95 %	10 a 100	Bajo	(Sylvia et al., 2023) (王, 2023)
Precipitador electrostático	1 a 5 kPa	1000 a 200.000	\$50.000 a \$10.000	> 99 %	0,01 a 100	Medio	(Järvinen et al., 2023)
Separación por impacto	0,5 a 2,0 kPa	10 a 1000	\$1000 a \$15.000	80 % a > 95 %	> 10 mm	Bajo	(Shah et al., 2023)

Nota: la tabla 3 muestra los principales equipos utilizados para la remoción de sólidos, categorizados por su caída de presión, caudales de operación, costo, eficiencia de separación.

Por otra parte, se definió el equipo que permite recuperar los gases condensables de la corriente gaseosa del proceso. La primera alternativa era un sistema de separadores *Flash* para recuperar gases no condensables y la segunda alternativa consistía en la incorporación de una torre de destilación. Sin embargo, al comparar los requerimientos operativos y de diseño, se eligió el separador *Flash* como equipo de separación de la corriente de salida de gases del proceso.

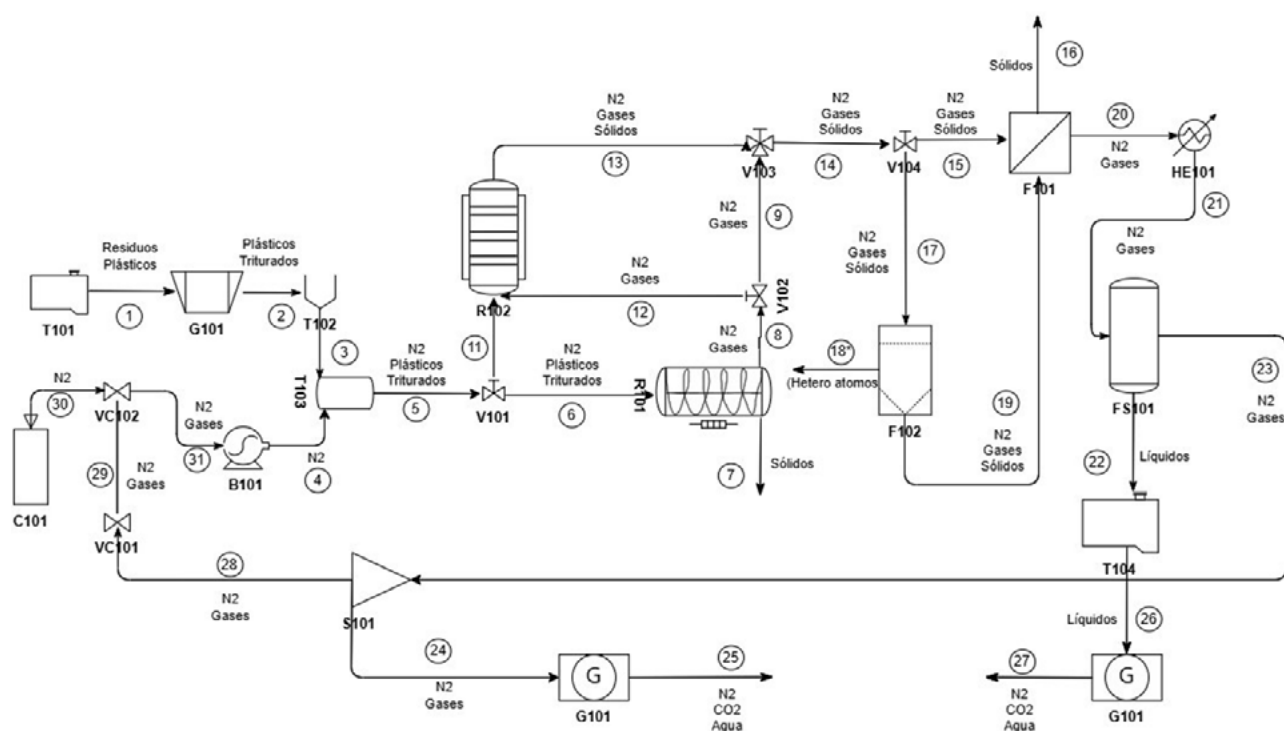
Se debe aclarar que la materia prima que alimenta al proceso es una mezcla de residuos plásticos del área metropolitana de Bucaramanga con composiciones máxicas de: 15,79 % PET, 4,59 % PVC, 49,48 % PE, 16,69 % PS y 13,45 % (Orellana Hernández, 2023).

Esta muestra se somete a un proceso de pirólisis a 500 °C, donde se obtiene un rendimiento del 82 % (generando residuos sólidos de 18 %), que genera residuos sólidos como producto no deseado (Miandad *et al.*, 2017a). Por otra parte, la selectividad del proceso para las fases líquida y gaseosa corresponde al 48,8 % y 52,1 %, respectivamente (Miandad *et al.*, 2017b). Esta corriente gaseosa tiene los siguientes compuestos: monóxido de carbono, metano, etano, propeno,

propano, buteno, butano, penteno, hexeno y dióxido de carbono (Honus *et al.*, 2018). Mientras tanto, la corriente líquida presenta los siguientes compuestos: azuleno, bifenilo, fenantreno, fenol, ácido 1,2-benzenodicarboxílico (ácido ftálico), beta-sitosterol, estigmasta-5,24(28)-dien-3-ol (3.beta.), terfenilo, 5'-fenil(Honus *et al.*, 2018).

El flujo estimado para la generación de energía eléctrica corresponde a 2,5 kg/h de mezcla. Este permite producir el requerimiento energético necesario para 10 casas aproximadamente, a partir únicamente de los productos obtenidos de la fase líquida. En caso de usar corriente gaseosa se podría suministrar la energía necesaria de 6 casas más.

Figura 1
Diagrama PFD del proceso



Nota: la figura 1 presenta el diagrama de los flujos y equipos de la planta piloto.

En el diagrama PFD del proceso de pirólisis (figura 1), es fundamental destacar tres aspectos importantes: A) si bien no se evidencia en el diagrama, el intercambiador de calor HE101 corresponde a un intercambiador de doble tubo, donde se utiliza como servicio industrial agua de enfriamiento. B) los calentamientos dados en el proceso se realizan por medio de resistencias eléctricas.

Este requerimiento energético se cubre mediante obtención de energía eléctrica producida con los gases que se envían al generador G101. Y, por último, C) en el proceso de purga que se realiza a la corriente gaseosa (23), se pierde parte del nitrógeno alimentado al proceso, por lo que es necesario alimentar una corriente fresca de N₂ (30), como se ilustra en el diagrama.

4. Discusión

El proceso de pirólisis consta de tres etapas claves: pretratamientos, sistema reactivo y posttratamientos, que permiten la generación de subproductos a partir de plásticos. El diseño de este proceso se enfocó en la investigación y, por consiguiente, se optó por tener una variedad en el tipo de plásticos a tratar, dada la posibilidad de obtener múltiples productos por la naturaleza del proceso.

En el tratamiento de los plásticos, antes de que se produzca la pirolización, se debe garantizar que estos contengan la menor cantidad de heteroátomos o inertes para obtener productos con un alto grado de pureza y asegurar su capacidad para la generación de energía eléctrica sin causar daños a los motores de combustión.

Para ello, Sahu *et al.* (2014), Miskolczi *et al.* (2009) y Chen *et al.* (2014) recomiendan que a

procesos escalables de plantas pilotos de pirólisis se desarrollen etapas para trituración, lavado y secado para garantizar la remoción de inertes o que otros compuestos generen dificultades en los postratamientos. Sin embargo, al tratarse de un diseño orientado únicamente a la investigación, la adición de sistemas como el lavado y secado dentro del proceso generarían costos mayores.

Además, de requerir el uso continuo de servicios industriales de agua, aire y energía. De esta manera, se recomienda que el personal que haga uso de la planta piloto garantice la presencia de plásticos limpios, previos a la incorporación al sistema. Teniendo esto en cuenta, se propone una revisión y limpieza previa de los plásticos para que puedan ser introducidos al proceso, donde se garantizaría la pureza de la muestra introducida.

El sistema reactivo es la parte principal del proceso y lo que permite que se produzcan los combustibles para la generación de energía eléctrica. En la tabla 2, se encontró que los mejores reactores para el proceso son de tornillo rotatorio y de lecho fluidizado, ya que presentan mejor desempeño en gran parte de las categorías presentadas (bajo costo, facilidad de escalabilidad, capacidad para lograr transferencia de masa y energía, eficiencia energética y facilidad de operación). Sin embargo, el reactor de tornillo rotario, pese a las ventajas mencionadas, no puede trabajar con un catalizador por el daño físico que sufriría al entrar en contacto con el reactor.

Por lo que, se optó por añadir lechos catalíticos a la corriente de gas de salida (Efika *et al.*, 2012). Por contraparte, el reactor de lecho fluidizado necesita la presencia de catalizador para poder operar el proceso, esto inicialmente se vería como una ventaja debido a que el catalizador ayuda a disminuir la temperatura de reacción de

sistema (disminuyendo la demanda energética para el calentamiento del reactor).

Sin embargo, gran parte de productos de interés como combustibles líquidos ocurren sin presencia de catalizador, por lo que resulta ineficiente si el objeto de uso de la planta es la purificación de combustibles como el diésel. Al presentarse tal disparidad en el proceso se propone la unión de ambos sistemas reactivos, donde se puede operar cada reactor independientemente (mediante un sistema de tuberías que permite el paso de la corriente a cada reactor). Además, la salida del reactor de tornillo rotatorio puede ser alimentada al reactor de lecho fluidizado para actuar como lecho catalítico y así conseguir un sistema reactivo que permite tratar mayor variedad de residuos plásticos, proceso que ya fue planteado por Park et al. (2020).

Por otra parte, los postratamientos del proceso garantizan que se separen y obtengan las materias de interés, de acuerdo con las condiciones de alimentación. Esta sección se divide en dos subprocesos: la remoción de residuos sólidos y la recuperación de los gases condensables.

La remoción de residuos sólidos es determinante para evitar que en cualquiera de las corrientes de salida del proceso se tenga material particulado (normalmente como polvo o coque) que sea nocivo o que pueda dañar los equipos en los que se utilicen los productos del proceso. El reactor de tornillo rotatorio tiene la ventaja de que algunos de sus modelos disponen de la capacidad de extraer gran parte de los sólidos más pesados que se generan durante la reacción.

Sin embargo, como se está trabajando con ambos reactores, sobre todo el de lecho fluidizado, se necesita una forma directa para purificar estas corrientes gaseosas. En la tabla 3, se presentan

las alternativas evaluadas para la separación de sólidos, donde se escogió el filtro debido a su versatilidad y eficiencia en la separación de diferentes sólidos de diversos tamaños, su caída de presión relativamente baja y su facilidad de mantenimiento.

Por otro lado, para la separación de la corriente líquida se optó por un separador *flash*, con el objetivo de ocupar un menor espacio en la distribución de la planta, evitar la necesidad de la implementación de un rehervidor y de servicios industriales adicionales. Se resalta finalmente que las corrientes gaseosa y líquida son usadas para la generación de energía eléctrica independientemente de sus composiciones.

5. Conclusiones

La pirólisis de residuos plásticos, a través de un sistema de reactor de lecho fluidizado y de tornillo, se presenta como una alternativa versátil para tratar diferentes tipos de residuos plásticos que se encuentran en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Así mismo, según los estudios realizados, tiene una alta eficiencia en la producción eléctrica, puesto que con un flujo de 2,5 kg/h de mezcla de plásticos se produce la energía necesaria para suministrar el requerimiento energético de un día de aproximadamente 10 casas (6,083974845 kWh/h).

Así mismo, la planta de pirólisis tiene un potencial desarrollo en el sentido de que esta tecnología se puede adaptar y trasladar a diferentes zonas geográficas, por lo que ayuda a suplir los problemas ambientales por la acumulación de residuos y energéticos, y crea comunidades energéticas que suplen las necesidades de las zonas no interconectadas del país.

Referencias

- Buekens, A. (2006). Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. In *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics* (pp. 1–41). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0470021543.ch1>
- Camacho Flórez, J. S., & Arciniegas Hernández, J. J. (2024). Diseño de una planta piloto de pirólisis orientada a la extracción selectiva de compuestos químicos con alta relevancia y valor agregado a partir de polietileno de alta densidad (PEAD). Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42346>
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34(12), 2466–2486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>
- Claudia Orellana Hernández. (2023). INFORME DE GESTIÓN IV TRIMESTRE 2023 CONTROL INTERNO DE GESTIÓN. <https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2024/01/INFORME-DE-GESTION-IV-OCIG-2023-V2.pdf>
- Dzięcioł, M., & Trzeczynski, J. (2000). Volatile products of poly(ethylene terephthalate) thermal degradation in nitrogen atmosphere. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(9), 1894–1901. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20000829\)77:9<1894::AID-APP5>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000829)77:9<1894::AID-APP5>3.0.CO;2-Y)
- Efika, C. E., Wu, C., & Williams, P. T. (2012). Syn-gas production from pyrolysis–catalytic steam reforming of waste biomass in a continuous screw kiln reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 87–94. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2012.01.010>
- Frączak, D., Fabiś, G., & Orlińska, B. (2021). Influence of the feedstock on the process parameters, product composition and pilot-scale cracking of plastics. *Materials*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/MA14113094/S1>
- Honus, S., Kumagai, S., Molnár, V., Fedorko, G., & Yoshioka, T. (2018). Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part II: Fuel characteristics. *Fuel*, 221, 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.075>
- Järvinen, A., Lehtoranta, K., Aakko-Saksa, P. T., Karppanen, M., Murtonen, T. T., Martikainen, J., Kuusisto, J., Nyyssönen, S., Koponen, P., Pimäkorpi, P., Friman, E., Orasuo, V., Rintanen, J., Jokiluoma, J., Kuittinen, N., & Rönkkö, T. (2023). Performance of a Wet Electrostatic Precipitator in Marine Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256860383>
- Kassargy, C., Awad, S., Burnens, G., Kahine, K., & Tazerout, M. (2018). Gasoline and diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite. *Fuel*, 224, 764–773. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.113>
- Kintek. (2022). ¿Cuáles Son Las Limitaciones De La Pirólisis? (10 Puntos Clave) - Kintek Solution. <https://es.kindle-tech.com/faqs/what-are-the-limitations-of-pyrolysis>
- Lee, K.-H., Kang, B.-S., Park, Y.-K., & Kim, J.-S. (2005). Influence of Reaction Temperature, Pretreatment, and a Char Removal Sys-

- tem on the Production of Bio-oil from Rice Straw by Fast Pyrolysis, Using a Fluidized Bed. *Energy & Fuels*, 19(5), 2179–2184. <https://doi.org/10.1021/ef050015o>
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Adrados, A., & Torres, A. (2011). Pyrolysis of municipal plastic wastes II: Influence of raw material composition under catalytic conditions. *Waste Management*, 31(9), 1973–1983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.021>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017a). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017b). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>
- Miandad, R., Nizami, A. S., Rehan, M., Barakat, M. A., Khan, M. I., Mustafa, A., Ismail, I. M. I., & Murphy, J. D. (2016). Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Management*, 58, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023>
- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Khan, H., Ismail, I. M. I., Dhavamani, J., Gardy, J., Hassanpour, A., & Nizami, A. S. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, 7(MAR). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00027>
- Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. (2009). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, 90(7), 1032–1040. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.019>
- Park, K. B., Jeong, Y. S., Guzelciftci, B., & Kim, J. S. (2020). Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyrolysis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes. *Applied Energy*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114240>
- Sahu, J. N., Mahalik, K. K., Nam, H. K., Ling, T. Y., Woon, T. S., Rahman, M. S. B. A., Mohanty, Y. K., Jayakumar, N. S., & Jamuar, S. S. (2014). Feasibility study for catalytic cracking of waste plastic to produce fuel oil with reference to Malaysia and simulation using ASPEN Plus. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 33(1), 298–307. <https://doi.org/10.1002/ep.11748>
- Shah, H. H., Amin, M., Iqbal, A., Nadeem, I., Kallin, M., Soomar, A. M., & Galal, A. M. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>
- Sylvia, N., Husin, H., Muslim, A., Yunardi, Syahrullah, A., Purnomo, H., Dewi, R., & Bindar, Y. (2023). Design and performance of a cyclone separator integrated with a bottom ash bed for the removal of fine particulate matter in a palm oil mill: A simulation study. *AIMS Environmental Science*, 10(3), 341–355. <https://doi.org/10.3934/environsci.2023020>

- Tang, C., Wang, Y.-Z., Zhou, Q., & Zheng, L. (2003). Catalytic effect of Al–Zn composite catalyst on the degradation of PVC-containing polymer mixtures into pyrolysis oil. *Polymer Degradation and Stability*, 81(1), 89–94. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00066-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00066-1)
- Williams, P. T., & Williams, E. A. (1999). Product Composition from the Fast Pyrolysis of Polystyrene. *Environmental Technology*, 20(11), 1109–1118. <https://doi.org/10.1080/09593332008616908>
- Xayachak, T., Haque, N., Parthasarathy, R., King, S., Emami, N., Lau, D., & Pramanik, B. K. (2022a). Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865>
- Xayachak, T., Haque, N., Parthasarathy, R., King, S., Emami, N., Lau, D., & Pramanik, B. K. (2022b). Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865>
- Zevenhoven, R., Axelsen, E. P., & Hupa, M. (2002). Pyrolysis of waste-derived fuel mixtures containing PVC. *Fuel*, 81(4), 507–510. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00168-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00168-5)
- 王国林. (2023). Numerical Study on High-Temperature Dedusting Performance of Cyclone Separator. *International Journal of Fluid Dynamics*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:257390956>

Potencial geotérmico de Colombia: estrategias y tecnologías para su explotación

Ángela Tarazona-Robles

Universidad Industrial de Santander, Colombia,
robles.angela310@gmail.com

Maika Gambús-Ordaz

Universidad Industrial de Santander, Colombia,
mkgambus@uis.edu.co

Javier Pérez

Ecopetrol, Colombia,
javier.perez@ecopetrol.com.co

César Patiño-Suárez

Ecopetrol, Colombia,
Cesar.Patino@ecopetrol.com.co

Resumen

En este artículo se hace una revisión bibliográfica de las características del potencial de los sistemas geotérmicos en Colombia, en especial los sistemas hidrotermales o convectivos y los sistemas conductivos, al igual que los yacimientos de alta temperatura en condiciones impermeables, conocidos como *hot dry rock* (HDR); así mismo, los métodos de producción convencionales y las nuevas estrategias innovadoras en la explotación de la energía geotérmica, como lo son los sistemas avanzados (AGS) y mejorados (EGS) a partir de los HDR, presentes en diferentes partes de Colombia. La metodología consistió en revisar artículos que evalúan las ventajas y desventajas de las tecnologías, potencial de Colombia, comparando sus enfoques y aplicabilidad en la ex-

plotación de yacimientos. Además, se analizaron conceptos técnicos y especificaciones de pozos utilizados en los diferentes tipos de yacimientos y sistemas de producción. Los resultados indican que, aunque los recursos geotérmicos en Colombia poseen un gran potencial, su desarrollo ha sido limitado en el pasado debido a la tecnología de perforación disponible. Sin embargo, los avances tecnológicos recientes podrán servir para aprovechar estos recursos con el objetivo de generación eléctrica; se proyecta que su explotación se generará en el futuro.

Palabras clave: recursos geotérmicos, explotación geotérmica, desarrollo geotérmico, sistema geotérmico mejorado (EGS), sistemas geotérmicos avanzados (AGS).

Biofuels in Colombia: challenges and opportunities

Julián Santiago Padilla Estupiñán

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
julianpadilla2004@gmail.com

Juan Diego Almeyda Carreño

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
judialca123@gmail.com

Luis Miguel Chávez Reales

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
luischavezreales@gmail.com

Jahir Sneyder Garavito

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
zsneyderz@gmail.com

Leydi Tatiana Cárdenas

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
leydi2202909@correo.uis.edu.co

Julián Fernando Sánchez Salinas

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
julian2215712@correo.uis.edu.co

Pablo Silva Ortiz

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
pablo.silva@uis.edu.co

Abstract

This article analyzes the impact of biofuels in Colombia within the context of the energy transition towards a more sustainable matrix. Over the last two decades, Colombia has implemented policies promoting the production of bioethanol and biodiesel, primarily derived from sugarcane and

palm oil, respectively. The biofuel industry has interacted significantly with the agricultural sector, contributing to economic development and reducing carbon emissions. However, the country faces challenges related to infrastructure, social inequality, and private investment, which could limit the sector's growth. This study proposes strategies to maximize the benefits of biofuels in



Colombia's energy transition, considering global trends and local sustainability needs.

Keywords: biofuels, bioethanol, biodiesel, energy transition, sustainability.

1. Introduction

Colombia is positioned as a country with great potential to lead biofuel production in Latin America. With the ambitious goal of achieving carbon neutrality by 2050, Colombia is promoting collaboration between public and private sectors to drive sustainable development in the energy industry. Key initiatives include the creation of public policies that integrate sustainability across all sectors and the implementation of tax incentives to encourage investment in advanced biofuels, such as Sustainable Aviation Fuel (SAF) and maritime fuels.

These actions not only contribute to decarbonization but also aim to diversify the country's energy matrix, supporting critical sectors like transportation. Colombia's biofuel production is backed by sustainable agriculture that maximizes the yield of crops such as sugarcane and palm oil, as well as investments in innovative technologies that will accelerate the energy transition. It is estimated that these strategies will generate thousands of jobs and attract significant investments, strengthening the national industry and consolidating Colombia's leadership in the region.

Development of biofuels in Colombia

Biofuels are an energy alternative derived from biomass, meaning organic material from plant or animal sources, which contribute to the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions

compared to fossil fuels, making them more environmentally friendly. Their production from renewable resources makes them a strategic option in the transition towards a cleaner energy matrix. In Colombia, the most common biofuels are bioethanol and biodiesel.

The biofuel industry has experienced accelerated growth in recent decades. Although its development began in the 1970s with the Brazilian Alcohol Program, it was in the 2000s when global interest in biofuels resurged due to the urgency of mitigating climate change and reducing dependence on fossil fuels. Among the most relevant biofuels, bioethanol and biodiesel stand out as viable solutions for the transportation sector.

Colombia has established itself as one of the largest biofuel producers in Latin America, with significant installed capacity for both bioethanol and biodiesel. Since 2008, the country has implemented blending mandates for gasoline-ethanol (10%) and diesel-biodiesel (5%). With six bioethanol plants and seven biodiesel plants in operation, and primarily uses sugarcane for ethanol and palm oil for biodiesel production.

According to Fedebiocombustibles, in 2022, more than 17 million private vehicles, motorcycles, and taxis consumed 394 million liters of fuel alcohol, of which 360 million liters were bioethanol produced from sugarcane in the Cauca River Valley and Puerto López, Meta. Additionally, the country consumed 207 million gallons of biodiesel, primarily made from palm oil, which replaced an equivalent amount of diesel or ACPM in key sectors such as passenger transport, cargo, and parcel services (Xataka Colombia, 2023).

The environmental impact has been significant. In 2022, thanks to the use of biofuels, Colombia avoided the emission of 2.8 million tons of CO₂



and 735 tons of particulate matter, highlighting the importance of these energy sources in mitigating climate change. Jorge Bendeck, Fedecom-bustibles president, stated that “adding the contribution of biodiesel and bioethanol, the national demand for biofuels was 20,400 barrels per day, produced 100% in Colombia, whose raw materials are cultivated by the hands of our energy communities and transformed by scientists and engineers into biofuels, characterized by their high sustainability” (Bendeck, 2022). He also noted that 85% of the resources generated by the sector returned to the Colombian countryside, adding value to agribusiness and promoting the growth of refineries and crops.

The national biofuel program contributed 7.6% to the country’s agricultural Gross domestic product (GDP) in the third quarter of 2022, underscoring its impact on the rural economy. Additionally, with the start of the renewable diesel program, CO₂ emissions are expected to decrease by 60 million tons by 2030, equivalent to planting a one-million-hectare forest (Xataka Colombia, 2023).

One of the factors that favor Colombia is the high productivity of its crops. In the case of sugarcane, the country boasts higher yields than other producing regions, such as Brazil and Australia. This is largely due to the equatorial climate and favorable soil conditions in the Cauca Valley, which allow continuous harvesting throughout the year. This high yield, along with investments in agricultural research and development, has made bioethanol production highly efficient.

Colombia’s potential to lead biofuel production in Latin America is enormous, especially in the context of the energy transition and international carbon neutrality commitments. The expansion

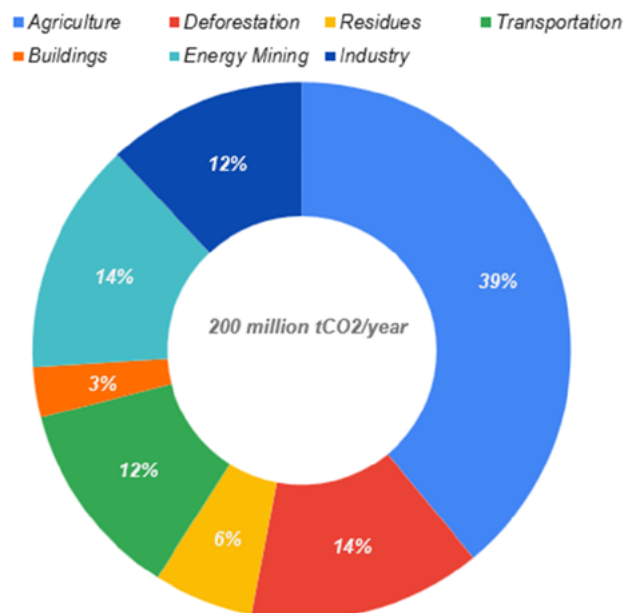
of bioethanol and biodiesel production has not only generated thousands of direct and indirect jobs (i.e., new opportunities related to the biomass supply chains, more specific harvesting, processing, distribution and final uses) but has also strengthened the agricultural sector while contributing to the reduction of greenhouse gas emissions.

Despite its great potential, the biofuel industry in Colombia faces significant challenges. One of them is the uncertainty surrounding global energy regulation and policies. The sector’s dependence on government mandates and subsidies makes it vulnerable to changes in public policies. Additionally, the arrival of second-generation biofuels (i.e., bagasse and straw from sugarcane), which do not directly compete with food crops, could change market dynamics.

The Ministry of Mines and Energy (MME) regulates biofuel prices, which are adjusted to international and local parameters through resolutions such as 181232 of 2008, derived from CONPES document 3510, which established guidelines for the sustainable production of bioethanol and biodiesel in the country. This regulatory approach ensures a minimum price for producers, guaranteeing the financial viability of investments in this sector.

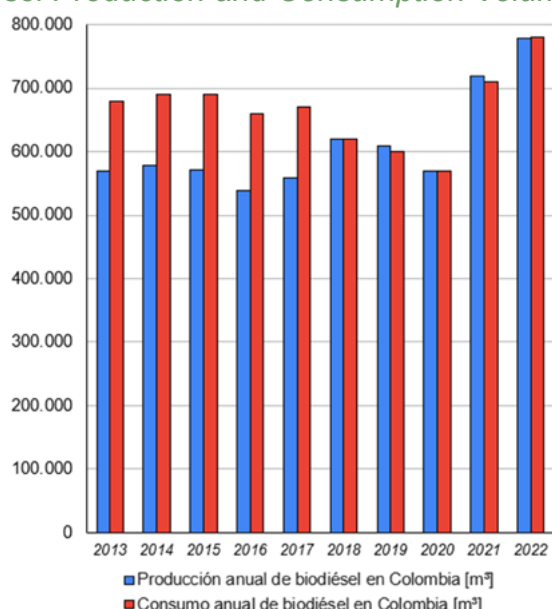
Furthermore, Colombia has implemented financial mechanisms, including low-interest loans offered by the Banco Agrario and irrigation programs to increase agricultural productivity, benefiting palm and sugarcane growers. These policies have created a strong domestic market, with mandatory blends of 10% for ethanol and 5% for biodiesel, encouraging both the production and consumption of biofuels in the country.

Figure 1
Contribution of CO₂ emissions in Colombia in 2016



Note: This figure shows the contribution of each sector in percentage to the total contribution of carbon dioxide emissions in Colombia, with the agricultural sector and deforestation being the most critical factors. “The biodiesel agroindustry in Colombia” (Salcedo and Ruiz Delgado, 2016).

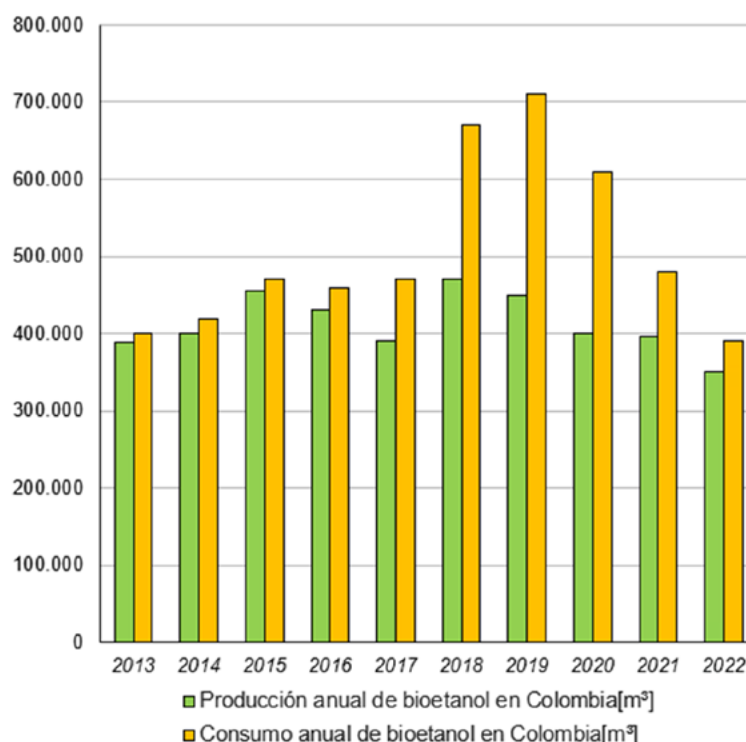
Figure 2
Colombia’s Annual Biodiesel Production and Consumption Volumes



Note: Biodiesel production and consumption in Colombia have increased by 36% since 2013, reaching a new record of approximately 780,000 cubic meters in 2022 (Torroba y Orozco, 2023).

Figure 3

Colombia's Annual Bioethanol Production and Consumption Volumes



Note: The bioethanol industry in Colombia has experienced a slowdown in recent years, with a 25.5% decrease in production and a 45.1% decrease in consumption compared to their historical highs (Torroba y Orozco, 2023).

Key players in biofuel development

The institutional structure supporting the biofuel industry in Colombia includes both government and private actors. The Ministry of Mines and Energy (MME) is responsible for regulating prices and blending percentages, while the Ministry of Environment, Housing, and Territorial Development (MAVDT) oversees environmental aspects, ensuring that production is sustainable. The Ministry of Agriculture and Rural Development (MADR) promotes agricultural development and acts as the technical secretariat of the Intersectoral Biofuels Commission.

Additionally, associations like ASOCAÑA (Sugarcane Growers Association) and FEDEPALMA (National Federation of Palm Oil Growers) play a vital role in representing producers and promoting sectoral policies that enhance the competitiveness and sustainability of Colombia's bioenergy sector. However, Colombia is well-positioned to seize opportunities in the production of advanced biofuels such as sustainable aviation fuel (SAF) and marine fuels, which would allow it to further diversify its energy matrix.

2. Discussion

The development of biofuels in Colombia has proven to be a key strategy in the transition towards a more sustainable energy matrix. With significant production of bioethanol and biodiesel, the country has not only reduced its greenhouse gas emissions but also strengthened its rural economy. However, considerable challenges persist that could limit the sector's growth. Dependence on government policies and subsidies, as well as uncertainty surrounding global energy regulations, pose risks that require immediate attention. Furthermore, competition with second-generation biofuels, which do not directly compete with food crops, could potentially change market dynamics.

The interaction between the agricultural sector and biofuel production is a positive aspect, as it contributes to the economic development of rural communities. However, it is crucial to ensure that this relationship is sustainable and does not exacerbate social inequality issues. Collaborative initiatives between the public and private sectors are essential to address these challenges and maximize the benefits of biofuels.

Despite the difficulties, implemented policies, such as blending mandates and tax incentives, have created a robust internal market that could be even more competitive if investments in innovative technologies are encouraged. Colombia's ability to produce advanced biofuels, such as sustainable aviation fuel, could further diversify its energy matrix and consolidate its position in the regional market.

3. Outlook

Colombia has great potential to lead biofuel production in Latin America, thereby contributing to its sustainability and carbon neutrality goals. The interaction between agricultural production and the biofuel industry has proven beneficial for both the economy and the environment. However, to maximize these benefits, it is essential to address existing challenges, including regulation, private investment, and social sustainability. Policies that promote innovation and the development of advanced biofuels will be crucial to strengthen the sector and ensure that Colombia not only meets its environmental goals, but also fully capitalizes on the economic opportunities offered in the region.

References

- Duarte, A. E., Sarache, W. A., & Cardona, C. A. (2012). Cost analysis of the location of Colombian biofuels plants. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 27(1), 59-70. https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000600009
- Alguero, M. O. (2024, August 5). Colombia busca ser pionera en los vuelos de cero emisiones con el uso de SAF, ¿cómo lo hará con caña y palma? *El Colombiano*.
- <https://www.elcolombiano.com/negocios/el-secreto-de-colombia-para-alcanzar-cero-emisiones-en-la-aviacion-en-2050-AD25157722>

Biocombustibles aportarán a la neutralidad del carbono en el 2050. Retrieved September 17, 2024, from <https://acis.org.co/portal/content/biocombustibles-aportaran-la-carbono-neutralidad-en-el-2050>

Inter-American Development Bank & Ministry of Mines and Energy, Government of Colombia. (2010, November 19). Sustainable energy and biofuel strategies for Colombia: Preliminary Report I (CO-TI052). Retrieved from <https://www.minenergia.gov.co/documents/9040/6777.pdf>

García Romero, H., & Calderón Etter, L. (2012). Evaluación de la política de biocombustibles en Colombia. Fedesarrollo. Retrieved from https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/338/RepOr_Octubre_2012_Garcia_y_Calderon.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Xataka Colombia (2023). Colombia rompió su récord de consumo de biocombustibles, aumentó 40% en 2022. Retrieved from <https://www.xataka.com.co/energia/colombia-rompio-su-record-consumo-biocombustibles-aumento-40-ciento-2022>

Torroba, A; Orozco, R, (2023). El estado de los biocombustibles líquidos en las Américas. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Salcedo, T., & Ruíz-Delgado, J. (2016). La agroindustria del biodiésel en Colombia. Palmas, 37(Especial Tomo II), pp. 331-335. https://fedepalma.org/wp-content/uploads/2016/12/M_3_20_-La-agroindustria-del-biodiesel.pdf

El rol del hidrógeno en la transición energética colombiana

Laura Sofía Monroy Morales

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
lauramomo99@gmail.com

Lily Karen Iguaán Duarte

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
lily2194094@correo.uis.edu.co

Carlos Andrés Suárez Rodríguez

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
carlos2182285@correo.uis.edu.co

Diana Carolina Pardo López

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
diana2203113@correo.uis.edu.co

Juan David Medina Güiza

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
jdmedinaguiza@gmail.com

Pablo Silva Ortiz

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
pablo.silva@uis.edu.co

Resumen

Este documento explora la importancia del hidrógeno, especialmente el hidrógeno verde o renovable, en la descarbonización de la matriz energética de Colombia. El departamento de La Guajira se destaca como un área clave para su producción, debido a su abundante potencial eólico y solar, que lo posicionan como un centro estratégico para la producción de hidrógeno verde en el país. Para convertir a La Guajira en un *hub*

exitoso, es esencial atraer inversiones, mejorar la infraestructura, fomentar la cooperación con las comunidades locales y apoyar nuevos emprendimientos. La hoja de ruta de Colombia propone tres fases: I) establecer leyes y estudios técnicos, II) impulsar el desarrollo del mercado y III) monitorear nuevas aplicaciones; esto garantiza el escalado del hidrógeno como solución sostenible para reducir emisiones y promover el desarrollo socioeconómico de la región.



Palabras clave: hidrógeno verde, La Guajira, descarbonización, energías renovables, electrólisis, matriz energética, transición energética, economía circular, desarrollo sostenible, infraestructura, financiación y políticas públicas.

1. Introducción

En el contexto actual del cambio climático y la urgente necesidad de transitar hacia una matriz energética más sostenible, el hidrógeno emerge como una solución prometedora para la descarbonización. Como el elemento más ligero conocido, compuesto por un solo protón y un electrón (*CIC energiGUNE, s.f.*), el hidrógeno (H_2) ha cobrado importancia en la última década gracias a sus diversas aplicaciones que ayudan a reducir las emisiones de carbono a nivel mundial. Algunas de estas aplicaciones en la industria química incluyen la fabricación de amoníaco y fertilizantes, en el área de la petroquímica para el refinado del petróleo y en la metalúrgica para la obtención de acero. Así como la implementación para la producción de combustibles de transporte terrestre, marítimo y aéreo (*ACCIONA, s. f.*).

Aunque es el elemento más abundante en el universo, el hidrógeno libre no se encuentra fácilmente en el planeta. Para su utilización, es necesario producirlo a partir de otros compuestos, lo que ha llevado a su clasificación en diferentes “colores”, según el método de producción empleado. Estos incluyen el H_2 negro o marrón, gris, azul, turquesa, rosa, verde y blanco, cada uno con impactos medioambientales y distintos procesos (Herrera, 2023). Los avances tecnológicos en su producción han convertido al H_2 en un pilar clave en la transición hacia un futuro energético más limpio y sostenible.

En Colombia, la producción de hidrógeno se centra en el H_2 azul, considerado una fuente de energía baja en carbono. No obstante, su obtención aún requiere el uso de combustibles fósiles. Para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a este proceso, se emplea la tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Los gases capturados se almacenan de manera segura y, en algunos casos, se reutilizan en la producción de biocombustibles, lo que contribuye a una economía más sostenible y reduce el impacto ambiental del proceso.

La región Caribe de Colombia, específicamente La Guajira, posee un alto potencial para la producción de hidrógeno verde, gracias a sus condiciones geográficas y climáticas favorables (BID, 2023). Esta alternativa es considerada la más ecológica, ya que se genera a partir de fuentes de energía renovables, principalmente la solar y la eólica. El H_2 verde se obtiene mediante electrólisis, un proceso que descompone el agua en oxígeno e hidrógeno usando electricidad proveniente de energías renovables (Baquero, 2024). A pesar de su potencial, la adopción del H_2 en Colombia enfrenta desafíos importantes, como la necesidad de infraestructura adecuada, financiamiento y el desarrollo de políticas energéticas que promuevan su producción y uso a gran escala. No obstante, con un marco regulatorio apropiado y el apoyo de la inversión tanto pública como privada, el H_2 podría desempeñar un papel crucial en la descarbonización de la matriz energética del país.

2. Metodología

A través de una revisión sistemática de bases de datos institucionales, especializadas y oficiales como la *Hoja de ruta del hidrógeno*, en Colombia, o la Cámara de Comercio, se recopilieron

los pasos sugeridos para el desarrollo de la implementación del hidrógeno verde en Colombia y específicamente en La Guajira.

Recomendaciones para el desarrollo del *hub* de hidrógeno verde en La Guajira

Para transformar La Guajira en un *polo tecnológico* de H₂ verde, es fundamental implementar las siguientes acciones:

1. **Inversión:** atraer recursos de inversionistas tanto públicos como privados para garantizar la financiación adecuada del proyecto. Por lo menos, el Grupo Ecopetrol inició su primer proyecto piloto de producción de hidrógeno verde en Colombia (Ecopetrol, 2022), su muestra clara de interés lo posiciona como un potencial inversor privado.

2. **Estrategia de cooperación:** desarrollar una estrategia de cooperación cercana con las comunidades locales para asegurar su participación y contar con su apoyo en todas las fases del proyecto.

3. **Infraestructura y servicios públicos:** mejorar el acceso a servicios públicos esenciales como electricidad y agua, además de fomentar la creación de empleos y el desarrollo de nuevas empresas locales.

4. **Encadenamientos productivos:** facilitar el establecimiento de encadenamientos productivos y proporcionar capital semilla para impulsar nuevos emprendimientos relacionados con el hidrógeno verde.

Pasos según la *Hoja de ruta del hidrógeno para Colombia*

En 2021, la hoja de ruta indica las siguientes 3 fases para su implementación en Colombia, con tiempos estimados para cada una de las etapas:

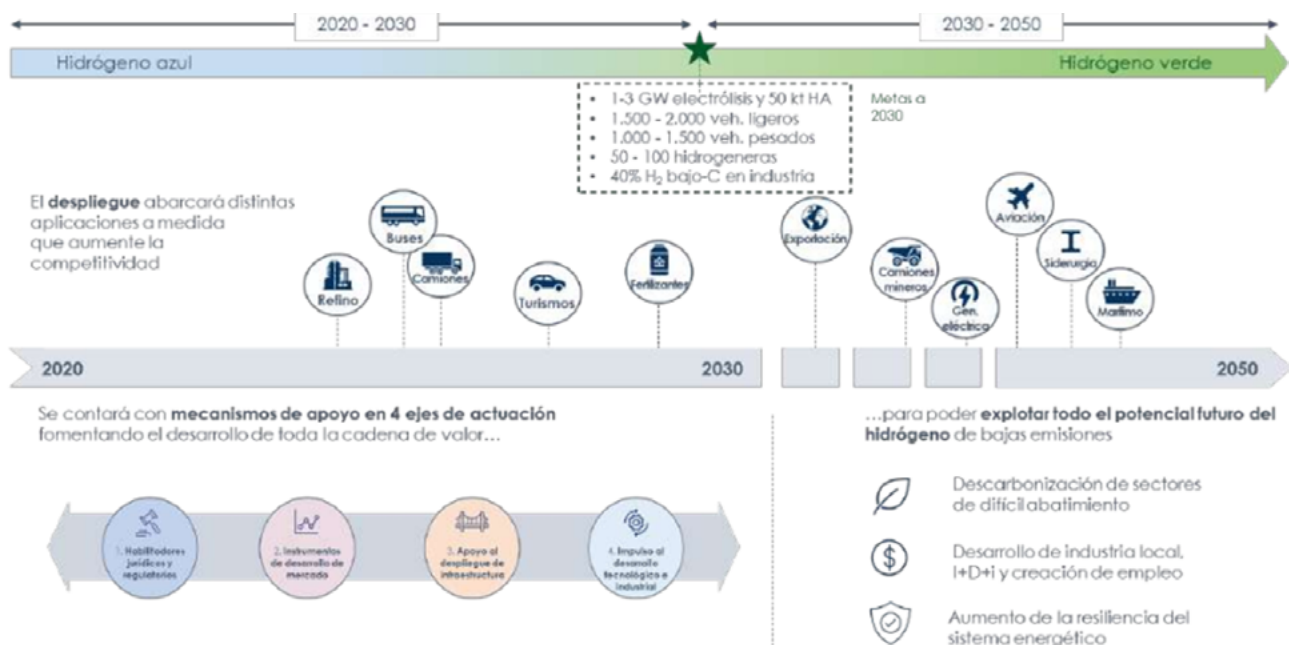
- **Fase 1.** Sentar las bases del hidrógeno: realizar acciones a corto plazo (*periodo inferior a 2 años*), como definición de leyes y elaboración de estudios técnicos y planes de capacitación, con el objetivo de establecer una base sólida para el desarrollo correcto del mercado.

- **Fase 2.** Habilitar e impulsar el desarrollo del mercado: tareas orientadas a promover el uso del hidrógeno de bajas emisiones. Estas medidas serán llevadas a cabo en el corto/medio plazo (*periodo inferior a 5 años*). Las primeras medidas se enfocan en incentivar y mitigar el riesgo de los primeros participantes, mientras que las más tardías buscarán conseguir el escalado del hidrógeno a lo largo de toda la cadena de valor.

- **Fase 3.** Monitorear y habilitar nuevos usos: acciones a realizar en el medio/largo plazo con objeto de dar seguimiento y garantizar la correcta implementación de las medidas de los periodos anteriores, así como hacer posible la entrada del hidrógeno en aquellas aplicaciones de menor madurez. Esta fase de monitoreo se considera en medio/largo plazo, ya que se tratará de acciones que se realizarán cíclicamente.

Figura 1

Estrategia nacional a 2050 en materia de hidrógeno de bajas emisiones



Fuente: *Hoja de ruta del hidrógeno Colombia, 2021*

5. Resultados Preliminares

Si se desarrolla según lo esperado la implementación de la hoja de ruta de hidrógeno en Colombia, con las recomendaciones mencionadas con anterioridad en la metodología, y teniendo en cuenta el alto potencial de La Guajira para la producción del H_2 , algunos de los resultados esperados según Baquero (2024) son:

- **Transformación y diversificación energética:** La Guajira, conocida por su producción de carbón y recursos naturales, podría diversificar su matriz energética hacia fuentes más limpias y sostenibles

con la generación de hidrógeno verde. Esto contribuiría a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a promover un modelo energético más verde y respetuoso con el medioambiente. Esto convertirá al departamento en un líder mundial en la producción de H_2 verde, y contribuirá significativamente a la descarbonización a nivel global.

- **Desarrollo económico:** con la generación de empleo en diversos sectores, atracción de inversiones nacionales e internacionales, diversificación económica, se reduce la dependencia de sectores tradicionales.

- **Desarrollo social:** mejora de la calidad de vida de las comunidades locales, fortalecimiento del tejido social y promoción de la educación y formación. La idea es garantizar que se beneficien directamente con la ejecución de los proyectos, que mejoren el acceso a servicios públicos esenciales como electricidad y agua en La Guajira.

- **Desarrollo ambiental:** reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, protección de la biodiversidad, mejora de la calidad del aire, del agua y el entorno natural de la región. También contribuirá al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad y cambio climático.

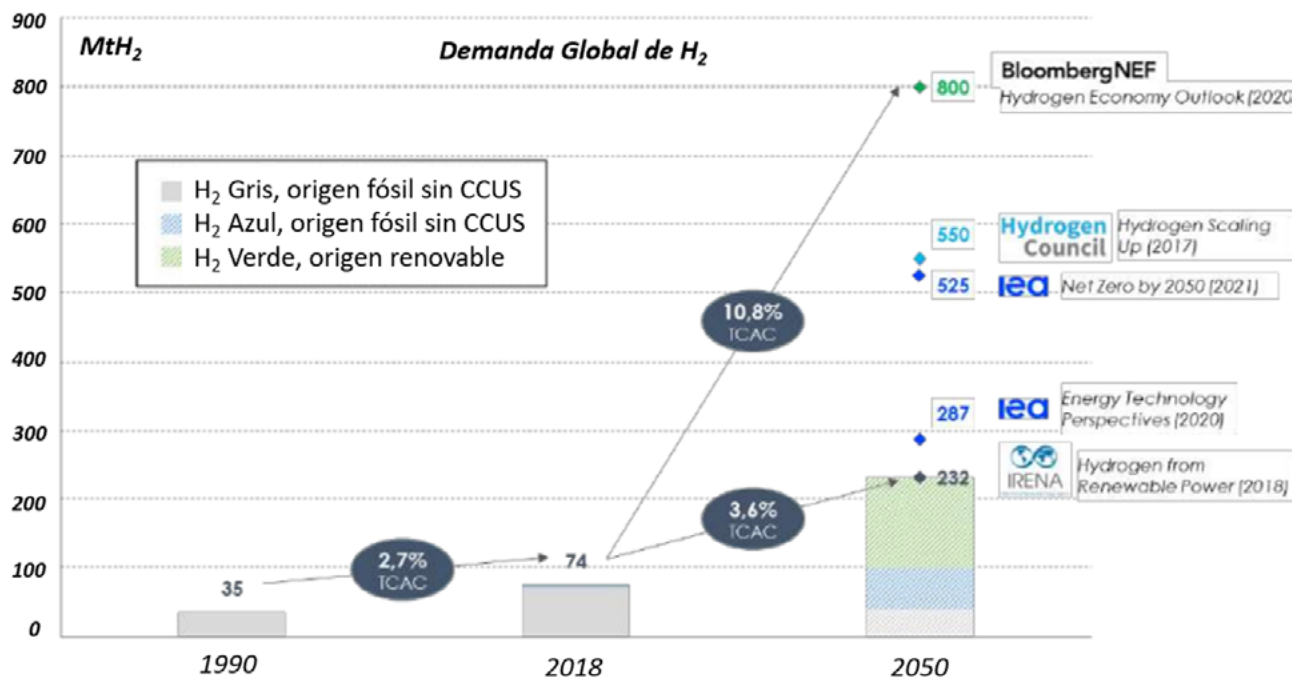
- **Innovación:** posicionamiento de La Guajira como centro de investigación y desarrollo en energías renovables.

- **Seguridad energética:** reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

Por otro lado, la hoja de ruta indica que la demanda global va a ser de más de 800 Mt en 2050 en los escenarios más optimistas (Fig. 2), lo cual da como resultado que Colombia se posicionará a nivel global en este mercado emergente, a través de acuerdos de cooperación para el acceso a nuevas tecnologías y la apertura de rutas para la exportación de hidrógeno y derivados.

Figura 2

Demanda global del hidrógeno a 2050



Fuente: Hoja de ruta del hidrógeno Colombia, 2021.

Según la hoja de ruta de hidrógeno verde, Colombia podrá tener precios competitivos en un mercado global en el que las grandes economías industriales importarán hidrógeno de bajas emisiones para cumplir sus objetivos de descarbonización. “Según datos de la IEA, a 2050 en Colombia producir un kilogramo de este podría costar entre US\$0,8 y US\$2,6 dependiendo de la zona” (Portafolio, 2022) o al menos esa es la meta.

6. Discusión y perspectivas

El desarrollo del *hub* de hidrógeno verde en La Guajira representa una oportunidad única para Colombia de liderar la transición energética en la región y de posicionarse como un jugador clave en la economía del hidrógeno a nivel mundial. Sin embargo, es fundamental abordar los desafíos existentes y diseñar políticas públicas que promuevan un desarrollo sostenible y equitativo. Este es un proyecto ambicioso y complejo que requiere de un enfoque multidisciplinario y de la colaboración de todos los actores involucrados. Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una base sólida para avanzar hacia la materialización de este proyecto y para construir un futuro más sostenible para Colombia.

- La Guajira, una región estratégica para la descarbonización de Colombia, ofrece un potencial único para convertirse en un *hub* de hidrógeno verde gracias a sus recursos naturales, como el viento y el sol. La producción de hidrógeno verde a partir de energías renovables no solo posicionaría a Colombia como un líder en la transición energética, sino que también contribuiría significativamente a la diversificación de su matriz energética y la reducción de emisiones GEI.

- El éxito del polo tecnológico de H₂ verde en La Guajira depende de la inversión y la infraestructura. La captación de inversiones públicas y privadas, junto con el desarrollo de infraestructuras clave, como acceso a electricidad y agua, son esenciales para garantizar la viabilidad y escalabilidad de este proyecto.

- Además, el establecimiento de encadenamientos productivos y la participación de las comunidades locales asegurarán un impacto económico y social sostenible.

Referencias

Aplicaciones del Hidrógeno Verde en Colombia: Impulsando la transición energética sostenible. AES Colombia. <https://www.aescol.com/es/blog/aplicaciones-del-hidrogeno-verde-en-colombia-impulsando-la-transicion-energetica-sostenible>

Banco Interamericano de Desarrollo BID (2023). Colombia gana posicionamiento en la industria de hidrógeno verde en Latinoamérica. Energía para el Futuro.

<https://blogs.iadb.org/energia/es/colombia-gana-posicionamiento-en-la-industria-de-hidrogeno-verde/>

Baquero, H. (2024, mayo 14). El hidrógeno verde y La Guajira. Guajira News. <https://www.guajiranews.com/opinion/el-hidrogeno-verde-y-la-guajira/>

Ecopetrol (2022). El Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/el-grupo-ecopetrol-inici-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia>

El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización | ACCIONA. (s. f.). https://www.accion.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=11734293023

Herrera, M. (2023, 2 junio). ¿Es el hidrógeno realmente una opción para sustituir a los combustibles fósiles? Plenoil Gasolineras. <https://plenoil.es/es-el-hidrogeno-realmente-una-opcion-para-sustituir-a-los-combustibles-fosiles/>

Ministerio de Minas y Energía (2021). Hoja de ruta para el hidrógeno en Colombia. (<https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/>)

Invierta en Colombia (2023). Infraestructura y desarrollo del mercado de hidrógeno verde en Colombia.

<https://investincolombia.com.co/es/sectores/energia/hidrogeno-verde>

Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. (s. f.). CIC energiGUNE. <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>

Portafolio, R. (2022, 30 agosto). En La Guajira se produciría el hidrógeno verde más barato. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/en-la-guajira-se-produciria-el-hidrogeno-verde-mas-barato-570261>

Rivera, A. (2024, 31 de enero). Oportunidades del hidrógeno verde en La Guajira. Cámara de Comercio de La Guajira. <https://camara-guajira.org/oportunidades-del-hidrogeno-verde-en-la-guajira/>

Marine Fuels: Difficulties and Advantages, Colombian Vision

Esmeralda Arcila Bolaño

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
esmeraldaarcilab@gmail.com

Luis Felipe Duarte Díaz

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
luisduiaz180903@gmail.com

Édinson Arley Moreno Silva

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
silvarley2004@gmail.com

Mario Antonio Gómez Barros

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
sanfairer@gmail.com

María Paula Pedrozo Arenas

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
paulaarenas0612@outlook.com

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
jejarami@uis.edu.co

Pablo Silva Ortiz

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
pablo.silva@uis.edu.co

Abstract

Global shipping, essential for trade, faces environmental challenges due to its high dependence on fossil fuels. In response, the International Maritime Organization (IMO) has set ambitious emission reduction targets for 2030 and 2050, promoting the use of cleaner energy alternati-

ves such as liquefied natural gas (LNG), biofuels, hydrogen and ammonia. This report analyses the current state of the maritime sector in Colombia, its barriers and opportunities for the deployment of renewable energies, especially biofuels and hydrogen. Identified infrastructure and supply chain constraints, as well as the country's potential to produce microalgal-derived biofuels. Finally,



strategies are proposed for Colombia to meet its emissions reduction commitments by 2050, aligning with the global decarbonization targets for maritime transport.

Keywords: *Maritime transport, Biofuels, Decarbonisation, Hydrogen*

1. Introduction

Maritime transport sector has been a key part of international trade because of its ability to efficiently and economically transport large volumes of goods. Currently, more than 80% of global trade is conducted via maritime transport (UNCTAD, 2021). However, this sector faces significant challenges related to environmental sustainability. Marine fuels, mostly derived from oil, have been identified as a major source of greenhouse gas (GHG) emissions, contributing significantly to climate change.

The International Maritime Organization (IMO) has taken drastic measures to reduce emissions from shipping. In 2020, a limit on the sulphur content of marine fuels was implemented at 0.5%, and by 2023 targets were set to reach net zero emissions by 2050. Strategies include reducing emissions in 20-30% by 2030, and 70-80% by 2040. These regulations have driven the search for cleaner energy alternatives, such as liquefied natural gas (LNG), biofuels, hydrogen and ammonia, which present both opportunities and challenges in terms of infrastructure, costs and availability (Smith *et al.*, 2022). The objective of this work is to analyze the current state of these technologies in the Colombian context and explore the opportunities and challenges the country faces in implementing renewable energies in the maritime sector, with a special emphasis on biofuels and hydrogen.

1.1 National Demand and Export of Hydrogen

Hydrogen is emerging as a key energy source in the global effort to decarbonize various industrial and transportation sectors. In Colombia, the current demand for hydrogen, estimated at 150 kilotons (kt), is mostly generated through natural gas reforming (gray hydrogen), with refineries being the main consumers. Other sectors, such as fertilizer production and some industrial uses (like the production of float glass or the processing of fats and oils), also use hydrogen, though on a smaller scale, including some electrolytic hydrogen produced with electricity from the grid.

Regarding future demand, the country expects a transition to low-emission hydrogen (green or blue), with a projected demand increase to 120 kt by 2030. This growth will be driven by the decarbonization of industries that currently consume hydrogen, such as fuel refining and fertilizer production. Additionally, the transportation sector, specifically heavy transport (buses and trucks), is expected to begin adopting hydrogen as an energy source starting in 2026.

In terms of export, Colombia has the potential to integrate into the international low-emission hydrogen market. This would include countries in Latin America as well as major international markets in Europe and Asia, which are looking to reduce their emissions and rely less on fossil fuels. In this way, Colombia would position itself as a key exporter in this new global energy market as presented in H₂ Roadmap, horizon 2030-2050 (Fig. 1), where the country may reach a demand of 1,850 kt of H₂ in 2050 (including the participation of sectors such as aviation and maritime).

Figure 1





Source: (Ministry of Mines and Energy of Colombia, Minenergía, 2021)

2. Methodology

Based on a systematic review, using institutional and specialized databases such as the Hydrogen Roadmap in Colombia, primary data will be collected to estimate the implementation potential of green hydrogen. Moreover, a technical economic analysis (TEA) of several pathways for H₂ production will be used to rank the promising technologies focus on energy integration opportunities in the Reficar Refinery and the Cartagena Port (Puerto de Cartagena, Colombia).

Process Production/Supply Chains

Colombia has historically relied on heavy fuel oil (HFO) and marine diesel (MDO) as the main energy sources in maritime transport. These fuels are highly polluting, especially HFO, which due to its high sulphur content is responsible for the emission of large amounts of sulphur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x) and particulate

matter (ANDI, 2021). Although international regulations have forced industry to implement scrubbers to reduce emissions, these devices generate waste that pollutes the oceans (IDEAM, 2020).

In terms of biofuels, Colombia has great potential given its access to raw materials such as vegetable oils and organic waste. However, its implementation in the maritime sector is still in its infancy. The main types of biofuels available are biodiesel, bioethanol and liquefied biogas (bio-LNG). These can be used on ships without modifying current engines, which facilitates their gradual adoption. For example, biodiesel can be mixed with low sulphur fuel oil (VLSFO) in proportions of up to 30%, which allows reducing emissions of CO₂ and other pollutants without sacrificing the operational efficiency of ships (Kanchiralla, F. M., Brynolf, S., & Mjelde, A. 2024).

The export of fossil fuels in Colombia is a fundamental element in its trade balance; it reached

55% of the value of its exports in 2022 (Thema & García, 2023). However, as the world is shifting towards a low-carbon economy, the country faces a gradual decline in both its fossil fuel exports and domestic consumption. To support this transition, the production and export of green hydrogen could help Colombia progressively replace the role of conventional energy sources in its national economy (Minenergía, 2021). From a maritime perspective, Colombia's strategic position between the Atlantic and Pacific oceans, and its proximity to sea routes allows for wide access. For example, biodiesel can be mixed with low sulphur fuel oil (VLSFO) in proportions of up to 30%, which allows reducing emissions of CO₂ and other pollutants without sacrificing the operational efficiency of ships (Kanchiralla, F. M., Brynolf, S., & Mjelde, A. 2024).

Ports like Cartagena benefit from their proximity to the Panama Canal and their proximity to vast renewable energy resources. This can be used for fuel loading of ships waiting to enter the canal or as fuel supplied directly to Panama, highlighting Colombia's potential to become a hydrogen logistics hub, supplying neighbouring countries by sea and land (Ministry of Mines and Energy of Colombia, 2021)

The export of fossil fuels in Colombia is a fundamental element in its trade balance; it reached 55% of the value of its exports in 2022 (Thema & García, 2023). However, as the world is shifting towards a low-carbon economy, the country faces a gradual decline in both its fossil fuel exports and domestic consumption. To support this transition, the production and export of green hydrogen could help Colombia progressively replace the role of conventional energy sources in its national economy (Ministry of Mines and Energy of

Colombia, 2021). From a maritime perspective, Colombia's strategic position between the Atlantic and Pacific oceans, along with its proximity to major sea routes, provides broad access to international markets.

Shipping ports like Cartagena benefit from their proximity to the Panama Canal and their proximity to vast renewable energy resources. This can be used for fuel loading of ships waiting to enter the canal or as fuel supplied directly to Panama, highlighting Colombia's potential to become a hydrogen logistics hub, supplying neighbouring countries by sea and land (Ministry of Mines and Energy of Colombia, 2021).

Liquefied bio-ammonia, bio-hydrogen, bio-liquid methane and bio-ethanol are promising biofuels that are produced from renewable sources and offer multiple sustainability benefits.

Bioammonia is obtained by the Haber-Bosch process using renewable hydrogen and atmospheric nitrogen, which stands out for its versatility as a fertiliser, fuel and energy storage medium (Luna Barrios & Pérez Zuñiga, 2024). Biohydrogen generated by fermentation or biological electrolysis is clean and adaptable to electricity generation and transport. Bio Liquid methane is produced from biomass through anaerobic digestion and liquefaction, promoting the circular economy (Romero, M. 2020). Finally, biomethanol is derived from purified biogas and offers greater energy efficiency. However, these biofuels face significant challenges such as high production costs, the need for specific infrastructure and limited availability of resources, which limits their large-scale adoption (International, A. T. 2023).

Infrastructure and Supply Chain

At the infrastructure level, Colombia has significant constraints. The ports of Cartagena and Buenaventura, which are the main ones in the country, are better equipped for handling fossil fuels than for cleaner alternatives such as LNG, hydrogen or biofuels. Although Cartagena has made progress in the implementation of LNG supply facilities, infrastructure for other clean fuels is still scarce. This represents a major challenge for the decarbonization of the maritime sector in the country.

Colombia is positioning itself as a key player in the production of green hydrogen in Latin America, due to its abundant renewable energy resources and a number of strategic initiatives. Currently, the country produces approximately 155,000 tons of hydrogen per year, mainly from fossil sources (UPME, 2009). However, by 2030, Colombia is projected to begin large-scale green hydrogen production, with estimates of a production capacity of 1 to 3 GW.

In addition to meeting domestic demand, Colombia has the opportunity to export green hydrogen to international markets, especially countries that seek to decarbonize their industries and have fewer resources to produce green hydrogen efficiently (Special Portfolio Report, 2023). Besides, the modernisation of supply chains is a key challenge. Technological tools such as the Internet of Things and blockchain are beginning to be implemented in some ports to improve transparen-

cy and traceability of fuels, optimising logistics. However, these solutions are still in their infancy and will need to be adopted on a large scale to meet future demand for alternative fuels (Special Portfolio Report, 2023).

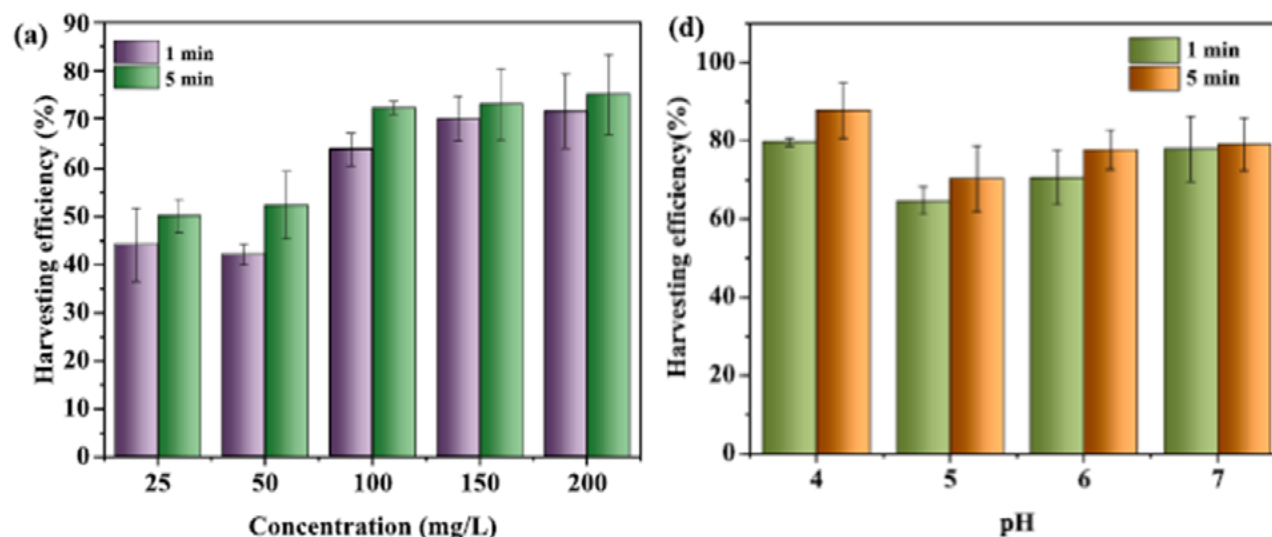
3. Preliminary Results

One promising aspect in the field of biofuels in Colombia is the use of microalgae as a raw material. The study conducted by Sumathi et al. (2024) investigated the effectiveness of magnetite nanoparticles (Fe_3O_4) in the harvesting of astaxanthin-producing microalgae, specifically *Haematococcus pluvialis* and *Chlorella zofingiensis*. The results demonstrated that Fe_3O_4 nanoparticles achieved a harvesting efficiency exceeding 99% for *Haematococcus pluvialis* at a concentration of 200 mg/L across all pH ranges, while *Chlorella zofingiensis* attained its maximum harvesting efficiency of 82.9% at 800 mg/L and pH4 (Sumathi et al., 2024).

Results from the reuse of Fe_3O_4 nanoparticles revealed a slight decrease in harvesting efficiency, maintaining a performance of 74% in the first cycle and 70% in the third cycle. This indicates that the nanoparticles are reusable and effective for multiple cycles of microalgae harvesting (Sumathi et al., 2024). The oils extracted from microalgae also meet the quality standards for biodiesel production, making them competitive with other traditional vegetable oils such as palm and soy oil (Delgado et al., 2015).

Figure 2

Harvesting efficiency of Haematococcus pluvialis. based on Fe_3O_4 Concentration and pH



Note. Measures at different concentrations by spectrophotometric method (optical density). Source: Adapted from Sumathi et al., 2024.

As shown in Figure 2, the results show that both, Fe_3O_4 concentration and pH, influence the harvesting efficiency of *Haematococcus pluvialis* cells (Sumathi et al., 2024). At higher Fe_3O_4 concentrations and higher pH, the harvesting efficiency is higher, and the hemocytometer method seems to show a constant high efficiency compared to the spectrophotometric method.

This increase in oil content reinforces the viability of microalgae as a source of sustainable biofuels. The oils extracted from microalgae also meet the quality standards for biodiesel production, making them competitive with other traditional vegetable oils such as palm and soy oil (Delgado et al., 2015).

These preliminary results suggest that large-scale production of biofuels from microalgae is viable in Colombia, providing a cleaner and more sustainable alternative to fossil fuels while contributing

to the reduction of GHG emissions (Gouveia, L., & Oliveira, A. C. 2008).

On the other hand, Colombia currently produces 260-300 million litres of ethanol per year, mainly from sugar cane in Valle del Cauca, which covers 82% of the national demand for the E10 blend (10% ethanol in gasoline). To achieve the E20 mixture (20% ethanol), production and cultivated area must be significantly increased. For biodiesel, the daily production capacity is 1,485 tonnes, but the country has a deficit of 61% to cover the demand for B5 (5% biodiesel in diesel) (Delgado et al., 2015).

In addition, Ecopetrol and the Colombian Petroleum Institute announced a pilot project for green hydrogen with an electrolysis capacity of 50 kW at the Cartagena refinery in 2022 (Ecopetrol, 2022).

In the same line, the Memorandum of Understanding (MOU) between Colombia and Germany Analysis and promotion of green hydrogen production in Colombia with the intention of exporting to Germany (H2LAC 2022). The Memorandum of Understanding between the Ministry of Mines and Energy and the Ministry of Transport of Colombia with the port of Rotterdam have decided to establish dialogues on the creation of an export and import corridor for green hydrogen and its derivatives between Low (H2LAC 2023).

4. Recommendations and Outlook: Strategies 2030 to 2050

Colombia has committed to reduce its emissions by 51% by 2030, limiting them to 16,944 Mt CO₂eq. Although transport accounts for 12% of emissions, shipping and inland waterways contribute 2% (AnalDEX, 2021). To meet its targets, the country is focusing on biofuels such as liquefied bio-ammonia, bio-hydrogen, bio-liquefied methane and bio-methanol, produced from renewable sources. These fuels offer sustainable solutions, but their adoption faces economic and infrastructural challenges that require significant investments to drive the decarbonization of the sector. Achieving a significant reduction in emissions by 2050 will require not only strengthening the existing infrastructure for alternative fuel adoption, but also improving supply chains with advanced digital technologies.

In addition, strong investment in research and development will be required to increase local production of biofuels, exploit the country's natural resources and attract foreign investment. Partnerships between the private sector, government and academia will be essential to ensure a successful energy transition. To recognize the

opportunities and commercial impacts of hydrogen production in Colombia, strategic measures should be developed on existing work such as the National Hydrogen Strategy and Roadmap (NSHP).

This comprehensive plan outlines the introduction of hydrogen across the country and sets the goal of achieving a one-gigawatt electrolysis capacity by 2030, with 40% of low carbon hydrogen designated for industrial applications. The plan also describes an expansion of the infrastructure designed for hydrogen in the transport sector, with emphasis on an improvement of the working network of hydrogen for long-haul heavy transport (International PtX Hub, 2023).

Colombia is among the leading countries in terms of levelled hydrogen costs projected for 2050 (IRENA, 2022). The levelled cost of hydrogen is a financial parameter used to assess the cost of producing hydrogen throughout its life cycle. As countries around the world seek to reduce their local GHG emissions, there is an opportunity to export green hydrogen to regions that cannot produce sufficient quantities of this product on their own, such as Europe or Asia (among others).

Colombia could engage in negotiations with key trading partners to explore the demand for green hydrogen commercialization.

To capitalise on these opportunities, it is essential to develop an adequate infrastructure that facilitates the production, storage and transport of green hydrogen. This includes:

- Development of electrolyzers and production plants: Implement electrolysis technologies that allow the production of green hydrogen from renewable energy, taking

advantage of resources such as wind and solar energy available in Colombia (Minenergía).

- Transport and storage infrastructure: Building port facilities and distribution networks that allow efficient handling of green hydrogen, both for domestic consumption and export (Green H₂).

In brief, focusing on the development of green hydrogen would also provide an improvement in Colombia's economic stability by maintaining jobs in sectors impacted by the reduction of fossil-based fuels. The use of green hydrogen in mining and oil regions builds on existing infrastructure and knowledge, and promotes job retention and labour training. It is crucial that Colombia expedite the implementation of its energy policies to align with the international guidelines of the IMO. While the country has already taken important steps, such as IMO 2020, the path to complete decarbonisation of maritime transport requires more investment and political commitment in the coming decades.

References

- Alicia. (2023, 18 agosto). Bio-GNL como solución en la descarbonización del transporte marítimo. Biometano.
- Anallex. (2021). Transición energética en el sector marítimo colombiano.
- ANDI. (2021). Informe sobre infraestructura portuaria en Colombia.
- Delgado, J. E., Salgado, J. J., & Perez, R. (2015). Perspectivas de los biocombustibles en Colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 14(27), 13-28. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI692-33242015000200002&lng=en&tlng=es
- Ecopetrol. (2022). El Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia.
- Goldemberg, J. N., & Coelho, F. (2008). Bioenergía no estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas (p. 152). Imprensa Oficial do Estado de São Paulo.
- Gouveia, L., & Oliveira, A. C. (2008). Microalgae as a raw material for biofuels production. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology.
- H2LAC. (2022). Colombia y puerto de Rotterdam firman memorando para un corredor de hidrógeno verde.
- H2LAC. (2023). Colombia y Alemania firman convenio para fomentar la industria del hidrógeno verde.
- IDEAM. (2020). Emisiones de la industria marítima en Colombia.
- Informe Especial de Portafolio. (2023). El impacto del IoT y blockchain en la cadena de suministro portuaria.
- Internacional, A. T. (2023, 26 septiembre). ¿Qué es el metanol verde y sus usos en la logística? AupaTrans. <https://aupatrans.com/que-es-el-metanol-verde/>
- International PtX Hub. (2023). Leveraging existing infrastructure and hydrogen demand to kickstart the transition to net zero.

- IRENA. (2022). Global hydrogen trade costs 2022 (Costos del comercio internacional de hidrógeno en 2022).
- Kanchiralla, F. M., Brynolf, S., & Mjelde, A. (2024). Role of biofuels, electro-fuels, and blue fuels for shipping: Environmental and economic life cycle considerations. *Energy & Environmental Science*.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2021). Colombia's hydrogen roadmap (Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia).
https://www.minenergia.gov.co/documentos/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- Morales-Sánchez, D., Tinoco-Valencia, R., Caro-Bermúdez, M. A., & Martínez, A. (2014). Culturing *Neochloris oleoabundans* microalga in a nitrogen-limited, heterotrophic fed-batch system to enhance lipid and carbohydrate accumulation.
- Muro, J. (2023, noviembre 3). Biometano, un nuevo aliado para descarbonizar el transporte. *Ethic*. <https://ethic.es/2023/11/bio-metano-un-nuevo-aliado-para-descarbonizar-el-transporte/>
- Organización Marítima Internacional (OMI). (2020). IMO 2020, la nueva normativa que impactará el transporte marítimo a escala global. *AnalDEX*. <https://analdex.org/2021/03/15/imo-2020-la-nueva-normativa-que-impactara-el-transporte-maritimo-a-escala-global/>
- Pérez Pariente, J. (2016). Biocombustibles. Fondo de Cultura Económica. <https://www-digitalpublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/640>
- Portafolio. (2023). Modernización de puertos en Colombia: Retos y oportunidades.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Biocombustibles en Colombia. República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía (2009).
- Romero, M. (2020). Biocombustibles y producción de bio-hidrógeno (No. 8). <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero38/Destacado-1.pdf>
- Smith, J., et al. (2022). Challenges and opportunities for decarbonizing maritime transport. *Journal of Marine Science and Technology*.
- Thema, J., & García, R. (2023). The Energy Transition in Colombia.
- Sumathi, Y., Kumar, P., Singhania, R. R., Chen, C. W., Gurunathan, B., Dong, C. D., & Patel, A. K. (2024). Harnessing Fe_3O_4 nanoparticles for sustainable harvesting of astaxanthin-producing microalgae: Advancing industrial-scale biorefinery. *Separation and Purification Technology*, 353, 128408. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128408>
- UNCTAD. (2021). Review of maritime transport 2021. United Nations Conference on Trade and Development.
- Luna Barrios E., J.; Perez Zuñiga D. Evaluación tecno-económica de la producción de bio-amoníaco a partir del raquis de palma africana. Universidad de San Buenaventura (Cartagena de Indias). Recuperado el 20 de septiembre de 2024, <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/75b77ef5-05c5-49cc-982e-6c9c5e2e3c68/content>

Smart grids: el núcleo de la digitalización en la transición energética

Daniel Enrique Peña León

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
daniel2220378@correo.uis.edu.co

Edwin Javier Moreno Suárez

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
edwin2224555@correo.uis.edu.co

Fabián Andrés Amado Núñez

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
fabianandresamado1@gmail.com

Fabián Mauricio Carvajal Castellanos

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
fabian2225535@correo.uis.edu.co

Pablo Andrés Silva Ortiz

Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia
pablo.silva@uis.edu.co

Resumen

La implementación de redes inteligentes (RI o *smart grids*) mejora significativamente la eficiencia de las comunicaciones en la red eléctrica a nivel mundial. A través de una adecuada estructuración y comprensión de su significado, se busca identificar si con el funcionamiento y la implementación de esta tecnología en la región colombiana se logra fortalecer la red energética del país; se analizan los distintos tipos de redes e infraestructura existentes, y se toma como referencia la implementación de esta tecnología en otros países. El principal objetivo es determinar la relevancia

de *smart grids* en Colombia, y explorar su contexto legal y las implicaciones reales, así como en casos donde se puedan implementar estas redes inteligentes. Además, se pretende establecer un marco de referencia internacional que permita realizar comparaciones y generar lineamientos para promover un mayor desarrollo orientado hacia la sostenibilidad.

Palabras clave: *smart grids*, estructuras, desarrollo, sostenibilidad.

1. Introducción

El desarrollo tecnológico de las *smart grids* está intrínsecamente ligado a la inteligencia artificial, lo que permite un análisis de datos que proporciona información sobre los comportamientos de consumo en tiempo real. Para evaluar la efectividad de la implementación de *smart grids*, es esencial identificar los tipos de redes y arquitecturas utilizadas en estos sistemas, y comprender así su capacidad y funcionamiento. Además, es fundamental analizar el marco legal vigente en Colombia y las leyes que regulan esta tecnología, así como examinar su desempeño en diversos países.

A partir de los componentes de las Smart Grids —*asociados a transporte, distribución, comercialización y digitalización*— se puede realizar una comparación con las regulaciones existentes que afectan el funcionamiento del sistema energético. Este análisis se enfoca en identificar aplicaciones específicas que permitan determinar la eficiencia de las *smart grids* en comparación con las redes eléctricas tradicionales a nivel global.

2. Metodología

La síntesis de las principales funcionalidades para el desarrollo de los RI en Colombia se presenta en la tabla I y figura I.

2.1 Contexto general

En el contexto de las *smart grids*, se postula que las redes inteligentes implican la implementación de procesos estratégicos innovadores, orientados a consolidar mecanismos que faciliten un control automatizado tanto en la industria como en el ámbito residencial. Este enfoque busca no solo fortalecer la eficiencia energética, sino también

garantizar la confiabilidad de las infraestructuras eléctricas.

“La modernización de los sistemas de automatización del sistema eléctrico es inevitable” (Calhau et al., 2014). Por esta razón, en diversas partes del mundo se han comenzado a emplear una variedad de sistemas para facilitar esta transición.

En el ámbito de las *smart grids*, se identifican sistemas como los de gestión de interrupciones, supervisión y control de datos, distribución y automatización del sistema de distribución (Politécnica et al., 2012). Esto se lleva a cabo en la búsqueda de una mitigación eficaz del cambio climático, así como las pérdidas en la red eléctrica. Además, se establecen necesidades emergentes dentro de las *smart grids* que se fundamentan en aspectos como comunicaciones móviles, transacciones telefónicas, reservas de servicios aeroportuarios, manufactura y operaciones bancarias en línea (Politécnica et al., 2012).

2.2 Smart grids a nivel mundial

A nivel global, las tendencias relacionadas con las *smart grids* están en constante aumento. Según la UPME (Parte III Política y Regulación, 2016), países como Estados Unidos, Brasil, Chile, Reino Unido y la Unión Europea han comenzado a implementar esta tecnología, lo que implica la actualización de sus sistemas. Asimismo, se busca establecer un control basado en la regulación de estos usos; esto incluye aspectos como la ciberseguridad, la interoperabilidad y la privacidad de los consumidores. Cada país regula estos aspectos de manera particular, lo que resulta en avances diversos según las políticas locales específicas de cada uno en los temas mencionados (ver figuras 2 a 5).

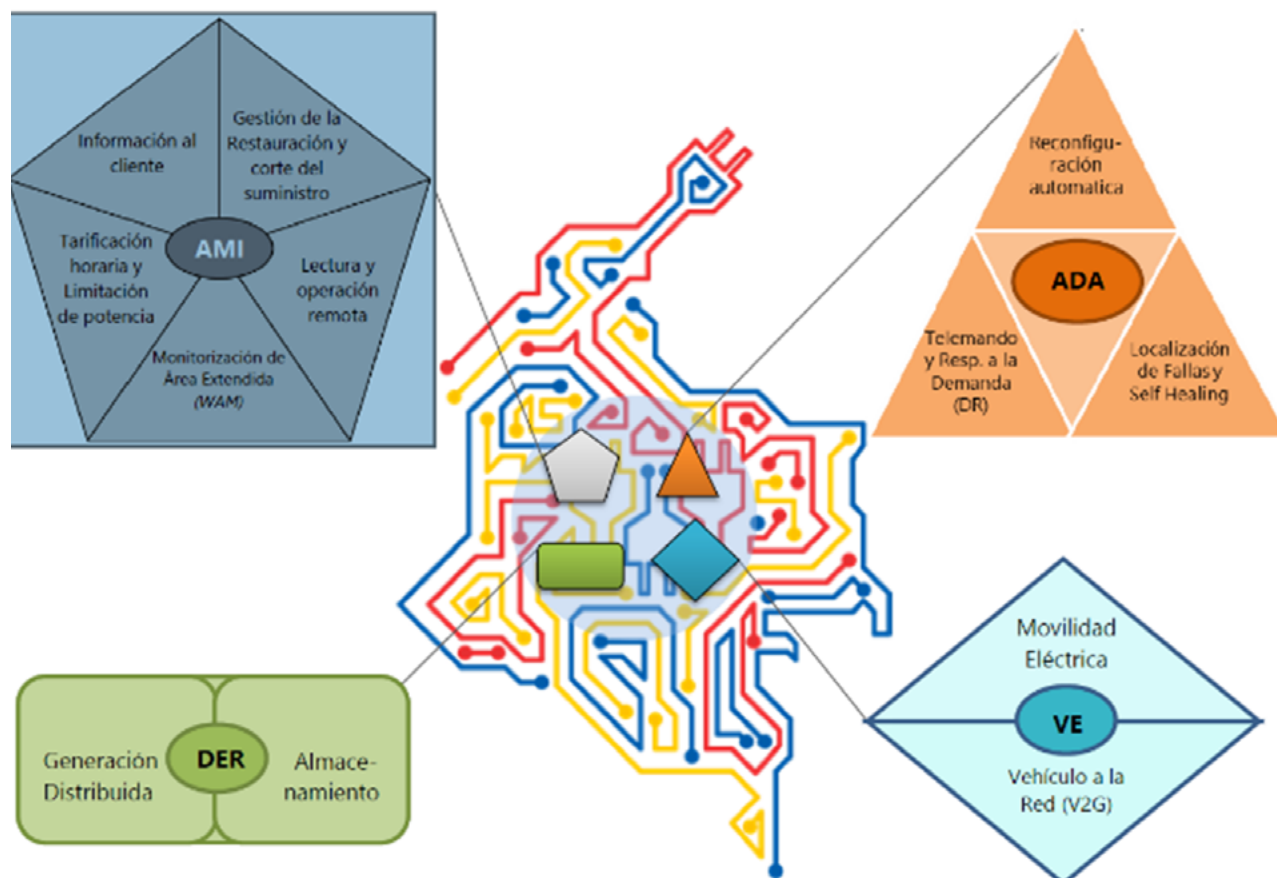
Tabla 1

Arquitectura multicapa de los RI

Aplicaciones de contadores y redes inteligentes	Aplicaciones de cliente		Capa de aplicación
Autenticación, control de acceso, integridad de los datos			Capa de seguridad
Telefonía Móvil, WiMax	PLC, DSL, Cable coaxial	PLC, ZigBee, Wifi, Z-Wave	Capa de Comunicaciones
WAN	NAN/FAN	HAN/BAN/IAN	
Transmisión y Generación	Distribución	Clientes	Capa de Energía

Figura 1

Arquitectura multicapa de los RI



Fuentes: Grupo técnico proyecto BID Smart Grids en Colombia (2016).

Figura 2

Características proyecto China Southern Power Grid

	Ubicación	Provincia de Guangdong	
	Entidad financiadora	China Southern Power Grid	
	Usuarios	No determinado	
	Fecha de inicio	2011	
	Estado actual	En fase de desarrollo.	
	Entidades participantes	- Huawei - Hongdian - China Mobile	

Gestión de la demanda y participación del usuario	Fiabilidad y calidad de red	Eficiencia de la red	Innovación del mercado	Generación distribuida a partir de ERNC	Desarrollo eléctrico para aumento de cobertura en las ZNI
✓	✓	✓	✓	✗	✗

Fuente: CIRCE

Figura 3

Características proyecto Austin Energy Smart Grid

	Ubicación	Austin, Tejas	 
	Entidad financiadora	Estado federal de Maryland	
	Usuarios	500.000	
	Fecha de inicio	2003	
	Estado actual	Completado en 2009.	
	Entidades participantes	Austin Energy, La ciudad de Austin, La camara de comercio de Austin, University of Texas, Applied Materials, Cisco, Dell, Freescale Semiconductor, GE, GridPoint, IBM, Intel, Microsoft, Oracle, SEMATECH consortium , Environmental Defense Fundation	

Gestión de la demanda y participación del usuario	Fiabilidad y calidad de red	Eficiencia de la red	Innovación del mercado	Generación distribuida a partir de ERNC	Desarrollo eléctrico para aumento de cobertura en las ZNI
✓	✓	✓	✓	✓	✗

Fuente: CIRCE

Figura 4
Características proyecto Telegestión de Enel en España

	Ubicación	España: Andalucía, sur de Extremadura, Aragón, Cataluña, Islas Baleares e Islas Canarias	
	Entidad financiadora	Endesa Distribución	
	Usuarios	13.000.000	
	Fecha de inicio	2010	
	Estado actual	En fase de desarrollo, finalización estimada en 2018.	
	Entidades participantes	Endesa Distribución	

Gestión de la demanda y participación del usuario	Fiabilidad y calidad de red	Eficiencia de la red	Innovación del mercado	Generación distribuida a partir de ERNC	Desarrollo eléctrico para aumento de cobertura en las ZNI
✓	✓	✓	✓	✗	✗

Fuente: CIRCE

Figura 5
Características proyecto iGreen Grid

	Ubicación	6 ubicaciones repartidas en toda Europa		
	Entidad financiadora	Comisión Europea		
	Usuarios	200.000		
	Fecha de inicio	2013		
	Estado actual	En fase de finalización, programada para 2015.		
	Entidades participantes	<u>Empresas Distribuidoras Europeas:</u> Unión Fenosa Distribución, S.A., Iberdrola Distribución (España), ERDF (Francia), ENEL (Italia), RWE (Alemania), Energie AG Netz (Austria), Salzburg AG (Austria), HEDMO (Grecia). <u>Entidades Investigadoras:</u> AIT (Austrian Institute of Technology), Tecnalia (España), RSE (Ricerca sul Sistema Energetico, Italia), ICCS-NTUA (Universidad de Atenas, Grecia).		

Gestión de la demanda y participación del usuario	Fiabilidad y calidad de red	Eficiencia de la red	Innovación del mercado	Generación distribuida a partir de ERNC	Desarrollo eléctrico para aumento de cobertura en las ZNI
✗	✓	✓	✓	✓	✗

Fuente: CIRCE

2.3 Smart grids en Colombia

En Colombia, el sistema de red energética está basada en un modelo antiguo, por esto, es importante entender que “El modelo centralizado de generación, transmisión, distribución y consumo de energía eléctrica que conocemos y utilizamos en realidad empezó a implementarse a principios del siglo XX y su fundamento permanece intacto a lo largo de un siglo”. Las redes inteligentes buscar mitigar los defectos ocasionados por estas implementando una red de flujo bidireccional en el que el generador y el consumidor puedan reconocer los datos para que se establezca una comunicación eficaz sobre el sistema (Social Informatics, 2022). Dentro de los beneficios se encuentran:

- Automatización y lectura remota de contadores de energía (AMI-AMR).
- Mejoramiento de la calidad del suministro eléctrico.
- Comunicación desde la generación, transmisión, distribución y usuario final.
- Flujo bidireccional de electricidad e información.
- Soporte para generación distribuida.
- Sistemas flexibles de tarifas.
- Fácil mantenimiento y operación.
- Integración de tipo de generación de una única red.

2.4 Normativa y leyes en Colombia

Las regulaciones de las leyes en Colombia establecen que se promueve el uso de energías renovables de manera no convencional, y se aclara la importancia de la implementación y modernización de las *smart grids* (Ley 1715 de 2014).

La implementación de la normativa de mediciones reguladas para el consumo eléctrico se establece con base en las *smart grids* (Creg024, 2015).

La Ley 142 de 1994 no tiene mención directa sobre la tecnología *smart grids* en Colombia, pero promueve la regulación de los servicios públicos; de esta manera, se definen algunos parámetros que deben ser tenidos en cuenta (Ley 142 de 1994). Al abarcar temas de eficiencia en el sistema de prestación del servicio eléctrico en Colombia, su regulación se basa en la Ley 143 de 1994.

Entre otros decretos, resoluciones que tienen relación con el desarrollo vital de las *smart grids*, se puede encontrar la guía de integración de recursos energéticos distribuidos (Smart Grids Colombia, 2030).

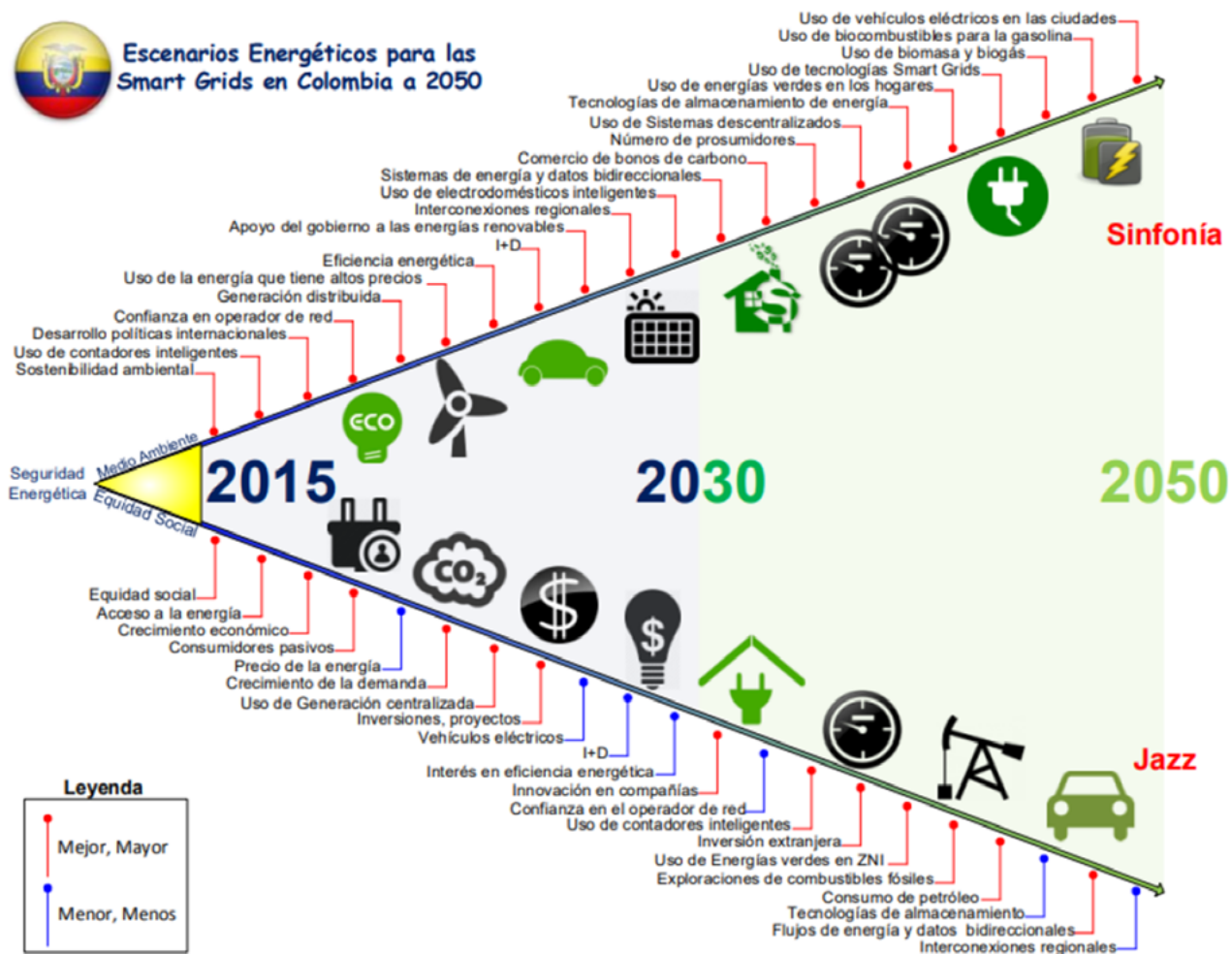
Las demás regulaciones políticas en Colombia serán establecidas en el apartado bibliográfico, ya que se tomaron en cuenta para la elaboración del documento.

2.5 Escenarios y aplicaciones para las smart grids en Colombia

La figura 6 presenta los escenarios para la implementación de las *smart grids* en Colombia, denominados “jazz y sinfonía”, donde son analizados escenarios tecnológicos prospectivos al 2030-2050.

Figura 6

Escenarios jazz y sinfonía para las smart grids en Colombia



Fuente: Díaz Toro (2014).

En Colombia, se posee una visión y un mapa para la implementación de *smart grids* por el UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), desde 2015, proyectados hasta 2030, donde se propone y especifica el uso y métodos de implementación de diversas tecnologías, por ejemplo:

- Medición inteligente (*smart metering* / AMI)
- Automatización de la distribución (ADA)

- Vehículos eléctricos (VE)

- Sistemas de gestión de la demanda

Realmente no se ha logrado un avance significativo en la implementación de estas tecnologías en el país y tampoco se tienen datos sobre proyectos a gran escala llevados a cabo para la transición a las tecnologías de *smart grids* en Colombia.

Este problema tiene un origen monetario, como gran parte de los problemas internacionales relacionados con *smart grids*, en la falta de políticas que obliguen a las empresas proveedoras de electricidad a acoger e implementar las tecnologías de RI, asimismo, en la escasez de proyectos de financiación estatal y la falta de la infraestructura necesaria para implementar estas tecnologías; esto lleva a la necesidad de una inversión inicial elevada.

Algunas aplicaciones planteadas que tendrían un gran impacto, y con las cuales no se necesitaría un cambio de infraestructura tan amplio como las anteriores, serían las tecnologías de:

- Generación distribuida (DER)
- Microrredes inteligentes

La implementación y apoyo a estas tecnologías específicas puede llegar a solucionar uno de los grandes problemas sociales del país, como lo es la falta de electricidad en zonas alejadas y vulnerables. Un ejemplo de estas zonas sería La Guajira, donde gran parte del departamento no cuenta con acceso a electricidad por falta de infraestructura para llevarla a caseríos o comunidades apartadas. Mediante la implementación de módulos de generación distribuida con paneles solares y/o generadores eólicos, junto con una microrred entre comunidades y módulos para eliminar fluctuaciones en el suministro de energía y compensar fallas esporádicas entre módulos, se podría solucionar el suministro de energía eléctrica en La Guajira. Sistemas similares servirán en otras zonas de la región Caribe, donde hay una gran cantidad de potencial solar, y en regiones montañosas andinas, donde hay gran potencial eólico.

3. Resultados preliminares

En el proyecto de investigación se pudo determinar la importancia de aplicar la tecnología de redes inteligentes en Colombia para poder afrontar situaciones presentes y tendencias futuras asociadas al suministro energético del país, tales como sequías, escasez de petróleo y escasez de gas natural, mediante la implementación de lectores inteligentes y sistemas descentralizados de energías renovables (Shahbazbegian *et al.*, 2023), que puedan aportar flexibilidad en el sistema de transmisión nacional. La implementación de *smart grids* en una investigación de literatura arroja que la implementación de las diferentes tecnologías que conforman las redes e infraestructuras eléctricas inteligentes proporciona una cantidad suficiente de beneficios para el país, lo que justifica su impulso y desarrollo hacia la implementación de una evolución sostenible con nuevas tecnologías. Concretamente, la implementación de dichas tecnologías aportaría al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. El uso de *smart grids* no solo permitiría afrontar futuras problemáticas en Colombia, también puede ser la clave para el suplemento de energías en secciones vulnerables del país y para la integración regional de América Latina.

4. Discusión y consideraciones finales

Un plan de implementación futuro para *smart grids* está siendo contemplado por el Ministerio de Minas en Colombia, el cual permite explorar la regulación y normativa requerida en el país. Algunas de las preguntas que surgen de este tema son cómo implementar estas nuevas tecnologías en zonas no interconectadas del país, donde la infraestructura es muy limitada y se requeriría

de una gran inversión para obtener un funcionamiento óptimo de *smart grids*. Segundo, cómo concientizar e impulsar los beneficios sociales y económicos que esta nueva tecnología de digitalización trae a las comunidades locales, empresas y el sector energético nacional. Desde esa perspectiva y elementos diferenciadores exploramos las RI en el Semillero de Investigación en Energías Renovables y Descarbonización-UIS, a partir de un enfoque regional y global.

5. Conclusiones

- La implementación de *smart grids* tiene la capacidad para abordar varios de los desafíos energéticos del país y ayudarnos a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. Colombia se beneficiaría de un modelo descentralizado que, mediante el uso de generación distribuida, microgrids, lectura remota de contadores, entre otras tecnologías claves de las *smart grids*, optimice la eficiencia del sistema de distribución de energía.
- La descentralización del sistema de distribución de energía eléctrica es clave para mitigar limitaciones existentes, como para permitir soluciones específicas para cada zona, con sus problemáticas particulares y facilitar la implementación de energías renovables en lugares aislados del país.
- Para poder implementar tecnologías de control como contadores remotos, es de vital importancia el uso *IoT* (Internet de las cosas) y tecnologías de *blockchain* que permitan tomar y transmitir datos, a la vez que protegen la información de los clien-

tes y protegen la integridad del sistema de energía de posibles ataques.

- El uso de *smart grids* es necesario para alcanzar el ODS 7 (objetivo de desarrollo sostenible). Sin embargo, esto supone superar obstáculos de infraestructura, altos costos e implementación de nuevas políticas que lo impulsen.
- La legislación actual colombiana (Ley 1715 de 2014, Creg 024-2015) permite y fomenta las energías renovables, pero se requiere de una mayor regulación que tenga capacidad de impulsar financiera y técnicamente al sector, ya sea por medio de incentivos o por medio de sanciones.

Referencias

- Shahbazbegian, V., Shafie-khah, M., Laaksonen, H., Strbac, G., & Ameli, H. (2023). Resilience-oriented operation of microgrids in the presence of power-to-hydrogen systems. *Applied Energy*, 348, 121429. 10.1016/j.apenergy.2023.121429
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). *Smart Grids Colombia Visión 2030. Parte I Antecedentes y Marco Conceptual del Análisis, Evaluación y Recomendaciones para la Implementación de Redes Inteligentes en Colombia. Smart Grids Colombia Visión 2030.*
- Calhau, F. G., Maristela, F., Nascimento, S., Martins Da Silva Bezerra, R., Sérgio, J., & Martins, B. (2014). *SMART GRIDS: características, requisitos y perspectivas.*

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Creg 024-2015, Colombia. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0024_2015.htm

Ley 142 de 1994, Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Ley 143 de 1994, Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4631>

Ley 1715 de 2014, Colombia. Integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Creg055-2017, Colombia. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0055_2017.htm

Ríos, A., & Gascó González, M. (2012). Actualidad de las Redes Inteligentes de Distribución Eléctrica.

Peralta Sevilla, A. G., & Amaya Fernández, F. (2013). evolution of the electricity networks towards smart grid in the andean region countries. 8, 48–61. <http://www.educacione-ningeneria.org>

Politécnica, U., Ecuador, S., Ortega, I., & Mauricio, E. (2012). Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554>

Lup, A. N. K., Soni, V., Keenan, B., Son, J., Taghartapeh, M. R., Morato, M. M., Poya, Y., & Montañés, R. M. (2023). Sustainable energy technologies for the Global South: Challenges and solutions toward achieving SDG 7. *Environmental Science: Advances*, 2(2), 570-585. <https://doi.org/10.1039/D2VA00247G>

Social Informatics (2022). <http://www.springer.com/series/7409>

Colombia, a key player in the Latin American energy transition

Pablo Andrés Silva Ortiz

Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia

pablo.silva@uis.edu.co

Abstract

In this article, it is addressing the energy transition in Colombia with a focus on democratizing energy access and reducing energy inequality. It explores how this transition aligns with the concept of a Just and Inclusive Energy Transition, which emphasizes equitable access to sustainable energy for all citizens. This analysis tracking the global energy transition, covering technology, investment and people-centred progress in the country.

Keywords: energy transition, democratization, digitalization, low-carbon economy, market design and colombian Vision.

1. Introduction

Democratization is one the pillars of energy transition, it refers to the broad and affordable access to energy, in an inclusive and participatory way, thus giving greater priority to the social quest in the exploitation of energy resources Economic activities are increasingly digitalized, and the exponential entry of new information and com-

munication technologies have led to a growing dependence on energy and way of life.

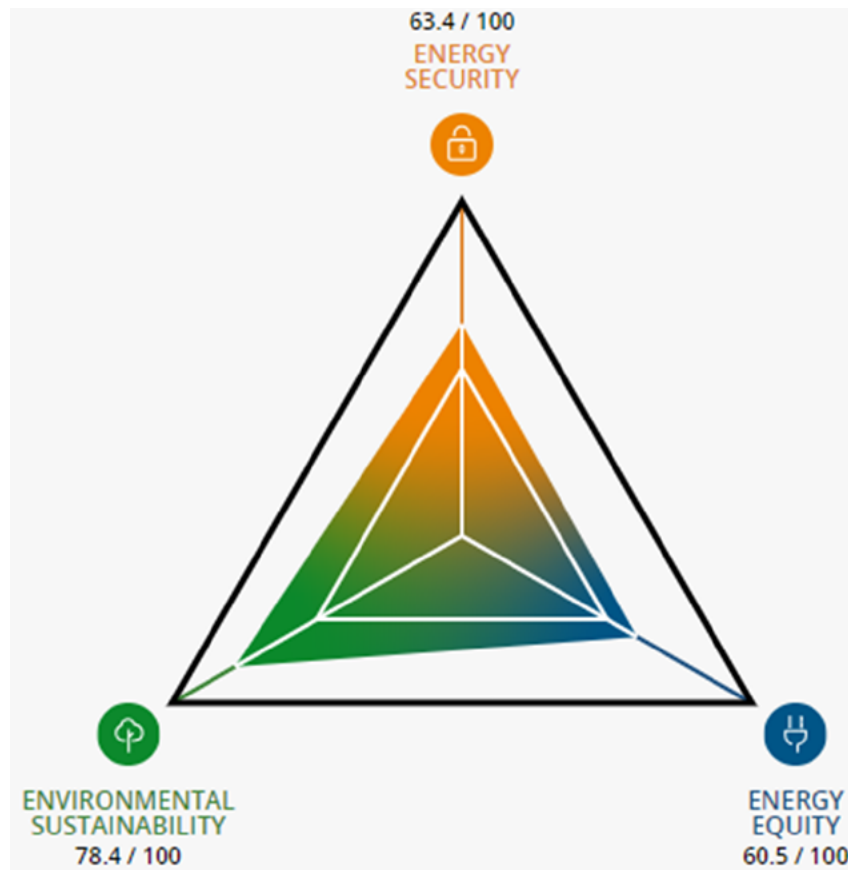
This trend will lead to an increased social gap which will widen the discrepancies in society, especially if many do not have access to cheap and quality energy. Without this, people will increasingly move into situations of economic difficulties making it more difficult to acquire a better standard of living.

2. Just transition and access to energy

Colombia, as a country characterized by a high degree of economic and social inequality, faces a great challenge in realizing a fair energy transition.

This concept, in turn, means that the decarbonization of the energy matrix is insufficient. While decarbonization is crucial, it must also include a high degree of digitalization, greater decentralization of energy systems, modernization of the regulatory framework, and development of a more inclusive energy market towards an upgrade of the electricity grid.

Figure 1
Colombian Energy Trilemma Index



Note: Colombia had an overall score of 65.7 and a rank of 42 in the 2023 World Energy Trilemma Index. The country scored 63.4 in Energy Security, 60.5 in Energy Equity, and 78.4 in Environmental Sustainability. World Energy Council (2024).

But what is exactly a fair/just energy transition?

Although, the definition does not have a proper consensus in the energy community, there are some commonly associated elements.

First, it acknowledges that climatic change, with increasing frequency and intensity of extreme climatic events disproportionately affect the most vulnerable populations in society. Therefore, the speed of decarbonizing the energy matrix must be accelerated while simultaneously stren-

gthening protections for these vulnerable groups against such events.

Second, while decarbonizing energy systems is globally beneficial, it can lead to significant losses for specific social groups, cities, and even entire regions whose livelihoods are tied to fossil fuel-based economic activities.

These communities may face challenges in rapidly adapting to a low-carbon economy. In such cases, it is essential to offer productive alternatives as-

sociated with low-emission energy sources that not only facilitate this transition but also provide opportunities for a better quality of life and avenues for increased income.

Furthermore, inequality in energy access is often related to other forms of socioeconomic inequality, such as ethnic-racial discrimination, gender disparity, income inequality, and limited access to decision-making processes. Low social mobility exacerbates these inequalities.

Thus, a just energy transition should not only drive a shift towards a low-carbon economy but also foster a more inclusive and equitable economy. This includes protecting the most vulnerable groups by expanding access to energy in underserved communities, thereby contributing to poverty eradication and addressing broader social inequalities.

3. Social and environmental responsibility

In this context, a fair energy transition is also a political issue, as it involves a shift towards a new development model based on a system that promotes energy security, greater economic efficiency, environmental responsibility, and social justice. Such a system aims to improve the quality of life for the population and enhance social well-being. Thus, for an energy transition to be truly fair, it must include political commitments that steer these transformations toward sustainable development in all its dimensions (social, environmental, and economic). This includes ensuring the democratization of energy access and engaging all sectors of society in the process. In conclusion, one of the greatest challenges of Colombia's current energy transition is the modernization of its energy markets (e.g., transporta-

tion and distribution systems, smart grids, smart meters and the legislative framework) in a way that incorporates the principles of a fair energy transition. This involves increasing the participation of vulnerable groups, ensuring a plurality of perspectives, and fostering greater social and environmental responsibility.

4. Conclusions and Outlook

This transformation must be systemic, inclusive and oriented towards the well-being of current and future generations. Colombia, with its abundance and diversity of resources, has the potential to be a key player in Latin American energy transition by developing a new business model. This model would be based on a low-carbon economy and technology promoting the democratization of energy access and expanding opportunities for all.

Hence, we will explore the energy transition concept, (with the students of the Semillero en Energías Renovables y Descarbonización at the School of Mechanical Engineering-UIS), in the following areas:

Expected contributions

- Biofuels: Challenges and Opportunities, Colombian Vision
- Marine Fuels: Difficulties and Advantages, Colombian Vision
- Smart Grids: Are they the core of the digitalization in the energy transition?
- Rol del H₂ en la transición energética colombiana

Takeaways:

Transitioning away from fossil-based fuels in non-energy systems is key to breaking the resilience of the fossil fuel industry and creating new business models.

The transportation sector is both hard-to-abate and hard-to-defossilize, but has the potential to drive systemic decarbonisation by leveraging alternative feedstocks using biogenic carbon and valorizing residues.

References

Emílio Matsumura; Pablo Silva. A descentralização à luz da transição energética. Recuperado em 10 de septiembre de 2024, de <https://eixos.com.br/energia-eletrica/a-descentralizacao-a-luz-da-transicao-energetica-por-emilio-matsumura-e-pablo-silva/>

Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa (Colombia). Recuperado en 01 de septiembre de 2024, de <https://www.minenergia.gov.co/es/servicio-al-ciudadano/foros/documentos-de-la-hoja-de-ruta-de-la-transición-energética-justa/>

Emílio Matsumura; Pablo Silva. A importância do desenho de mercado para a transição energética brasileira. Recuperado em 5 de septiembre de 2024, de <https://eixos.com.br/energia-eletrica/a-importancia-do-desenho-de-mercado-para-a-transicao-energetica-brasileira/>

World Energy Council (2024). Energy Trilemma Index. Colombian case. Recuperado em 1 de septiembre de 2024, de <https://trilemma.worldenergy.org/#!/country-profile?country=Colombia&year=2023>

Global Energy Transitions Stocktake (2024). International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/topics/global-energy-transitions-stocktake>

Energy transition Outlook (2023). International Renewable Energy Agency (IRENA). <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>

Consumo energético en aplicaciones web intensivas: un caso de estudio con raytracing

Daniel Felipe Jaimes Blanco

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
daniel2191726@correo.uis.edu.co

Gabriel Rodrigo Pedraza Ferreira

Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
gpedraza@uis.edu.co

Resumen

El objetivo de esta investigación fue analizar el consumo energético y el rendimiento de un *raytracer* ejecutado en navegadores web utilizando JavaScript y WebAssembly (Rust). Se evaluaron tres navegadores: Microsoft Edge, Google Chrome y Mozilla Firefox, bajo un ambiente controlado. Se midieron parámetros como el consumo energético, fotogramas por segundo (FPS), uso de RAM y tiempo de renderizado. Los resultados muestran que, en general, WebAssembly proporciona un rendimiento superior a JavaScript en las métricas evaluadas. Los navegadores presentaron un consumo energético similar en ambos casos, aunque Firefox destacó con un menor consumo al ejecutar el *raytracer*. En términos de FPS, WebAssembly superó ampliamente a JavaScript, con un promedio de 30-36 FPS frente a los

7-11 FPS de JavaScript. Además, WebAssembly permitió capturar una mayor cantidad de datos, y mejoró la eficiencia general en el tiempo de ejecución. En conclusión, WebAssembly (Rust) demostró ser una alternativa eficiente para el procesamiento de gráficos intensivos en comparación con JavaScript, lo que lo posiciona como una opción favorable para aplicaciones web que demanden un alto rendimiento.

Palabras clave: aplicaciones web, WebAssembly, JavaScript, Rust, raytracer, eficiencia energética, optimización web.

1. Introducción

En la era digital actual, la web ha dejado de ser un mero vehículo de comunicación para convertirse en el corazón de la infraestructura global. Desde la forma en que las personas interactúan socialmente hasta cómo se realizan negocios y se desarrollan nuevas tecnologías, la web es omnipresente. Sin embargo, con esta omnipresencia también surge una responsabilidad significativa: el impacto energético de las interacciones en línea. En estudios sobre computación ecológica, se destaca la importancia de reducir el consumo energético en el ámbito de la tecnología para avanzar hacia una infraestructura más sostenible (Vikram, 2015). A medida que aumenta la demanda de contenido y aplicaciones web, también lo hace el consumo energético asociado, lo que plantea desafíos importantes en un mundo que lucha por transitar hacia una matriz energética más sostenible (Pereira *et al.*, 2017).

La transición energética justa no es solo una meta para la industria energética tradicional, sino que también se extiende a la infraestructura digital que sustenta gran parte de la actividad humana moderna. Tecnologías como JavaScript, el lenguaje de programación dominante en la web, han sido fundamentales para la evolución de esta plataforma. No obstante, debido a su naturaleza interpretada y a sus limitaciones inherentes, JavaScript puede no ser siempre la opción más eficiente (De Macedo *et al.*, 2022), especialmente en tareas computacionalmente intensivas, como las simulaciones gráficas en 3D, donde el rendimiento y la eficiencia energética son críticos.

En este contexto, surge la necesidad de explorar nuevos paradigmas tecnológicos que permitan optimizar el uso de los recursos energéticos en la web. La búsqueda de la tecnología “ideal” es una carrera continua, ya que, a medida que evo-

luciona el hardware, el software debe adaptarse y mejorar constantemente. Aquí entra en juego WebAssembly, una tecnología relativamente nueva que promete mejorar de forma significativa el rendimiento de la web al permitir la ejecución de código casi a la velocidad nativa (Haas *et al.*, 2017), lo que podría reducir el consumo energético y, en última instancia, contribuir a una transición energética más justa.

Este estudio se centra en la evaluación de la implementación ordinaria de un raytracer, una técnica utilizada para simular la interacción de la luz con objetos en un entorno tridimensional, en dos tecnologías: JavaScript y WebAssembly. Un raytracer es un ejemplo claro de una tarea computacionalmente intensiva, ya que requiere calcular la trayectoria de miles de rayos de luz para generar imágenes realistas. Esta simulación es crucial no solo en aplicaciones gráficas, sino también en áreas como el diseño, la ingeniería y la ciencia, donde las simulaciones 3D son esenciales.

Además, es importante destacar cómo la elección de tecnologías y lenguajes de programación puede influir significativamente en el consumo energético, incluso en aplicaciones aparentemente simples como un raytracer en la web. Los lenguajes de alto nivel facilitan enormemente el desarrollo al abstraer muchos detalles de bajo nivel, pero esta comodidad viene acompañada de un mayor consumo de recursos (De Macedo *et al.*, 2021). En cambio, lenguajes como Rust, que ofrecen un mayor control sobre la gestión de memoria y la eficiencia en la ejecución, permiten una mayor optimización y un uso más responsable de los recursos.

Este artículo ofrece una visión de cómo la web, y en particular las tecnologías que la componen, pueden y deben evolucionar para afrontar los

retos energéticos del futuro, a través de un llamado a la comunidad académica y científica para involucrarse activamente en esta transformación.

2. Metodología

En esta sección, se describe el enfoque metodológico utilizado para comparar la eficiencia y el rendimiento de las implementaciones de un *raytracer* en JavaScript y WebAssembly (Rust) en un entorno web. El objetivo es ilustrar cómo diferentes tecnologías pueden influir en el consumo energético, incluso en aplicaciones cotidianas en la web.

2.1 Descripción del escenario de prueba

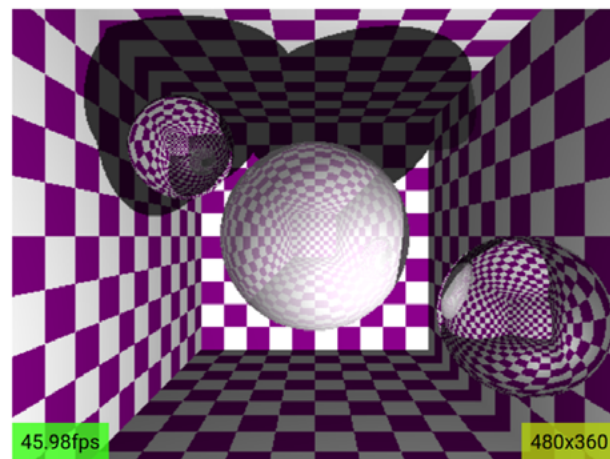
Para realizar una comparación adecuada entre las tecnologías, se seleccionó un escenario determinado que asegura que las diferencias de rendimiento y consumo energético sean evidentes. A continuación, se detallan el escenario seleccionado y sus características clave.

El escenario se centra en la evaluación de una implementación ordinaria de un *raytracer* en tiempo real, diseñado para generar imágenes de 480 × 360 píxeles. Este *raytracer* simula una escena en una habitación con un patrón de tablero de ajedrez en el suelo y las paredes, lo que añade complejidad visual y presenta desafíos en el cálculo de sombras y reflexiones. En el centro de la habitación, se encuentra una esfera fija que actúa como el objeto principal, mientras que dos esferas adicionales orbitan alrededor de ella. Estas esferas reflectantes crean un efecto visual dinámico y atractivo, y proporcionan una plataforma

idónea para evaluar el rendimiento y la eficiencia energética de las implementaciones en JavaScript y en WebAssembly.

Figura 1

Escenario final del raytracer utilizado



Nota: fotograma del *raytracer* evaluado¹⁰.

2.2 Configuración del entorno de pruebas

El entorno de pruebas fue cuidadosamente seleccionado para minimizar las interferencias externas y garantizar que los resultados sean lo más precisos posible. El *hardware* y *software* utilizados fueron configurados para medir el rendimiento y el consumo energético de manera efectiva.

- **Hardware:** las pruebas se realizaron en un portátil MSI equipado con un procesador Intel Core i7, una tarjeta gráfica NVIDIA RTX 4050 y 16 GB de RAM.
- **Sistema operativo:** se utilizó Arch Linux, conocido por su ligereza y flexibilidad, lo que permite un control preciso sobre el

entorno de ejecución y minimiza las interferencias externas durante las pruebas.

- **Navegadores web:** se seleccionaron tres navegadores populares: Google Chrome, Microsoft Edge y Mozilla Firefox. Estos navegadores representan diferentes motores de renderizado y optimizaciones, lo que permite un análisis comparativo en entornos variados.

Figura 2
Setup experimental utilizado



2.3 Implementaciones y ejecución

Las implementaciones en JavaScript y WebAssembly fueron desarrolladas para explorar las diferencias en rendimiento y eficiencia energética en un mismo escenario. Cada tecnología fue evaluada en condiciones controladas, asegurando que los resultados reflejen su verdadero potencial en aplicaciones web de alto rendimiento.

1. **En JavaScript:** la implementación ordinaria del *raytracer* utilizando JavaScript aprovecha las capacidades del lenguaje y la interoperabilidad con las APIs del navegador. JavaScript, un lenguaje interpretado y de alto nivel, es conocido por su facilidad de

uso y su capacidad para ser ejecutado en cualquier navegador moderno sin necesidad de compilación previa.

2. **En WebAssembly (Rust):** la segunda implementación se realiza en Rust, un lenguaje con un enfoque fuerte en sistemas, conocido por su eficiencia y seguridad. La implementación es compilada a WebAssembly, lo que permite ejecutar código de bajo nivel en la web. WebAssembly se presenta como una solución para superar las limitaciones de rendimiento inherentes a los lenguajes interpretados como JavaScript.

3. **Pruebas y medición:** se realizaron pruebas repetidas en cada navegador, utilizando herramientas de monitoreo como btop y powertop en Arch Linux para medir el uso de CPU, memoria y consumo energético. Las pruebas se centraron en la consistencia de los resultados, considerando la variabilidad natural del entorno web.

4. Para garantizar la validez de los resultados, es importante seguir metodologías que permitan la reproducibilidad de los estudios, como se ha señalado en investigaciones recientes sobre mediciones en la web (Demir et al., 2022).

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al ejecutar el *raytracer* bajo diferentes configuraciones en los tres navegadores evaluados: Microsoft Edge, Google Chrome y Firefox. Se analizan métricas clave como el consumo energético, el rendimiento de la CPU, el uso de memoria y los tiempos de renderizado. Estos resultados ofrecen una visión comparativa del

comportamiento de JavaScript y Rust/WebAssembly, y se resaltan las diferencias en eficiencia y rendimiento.

3.1 Consumo energético en configuración base

Antes de comenzar con las pruebas del *raytracer*, es fundamental establecer una línea base de consumo energético de los navegadores en reposo. Este valor servirá como referencia para comparar el incremento en el consumo una vez que el *raytracer* esté en ejecución, lo cual proporciona un contexto más claro sobre el impacto energético de cada configuración.

Tabla 1
Consumo base de los navegadores

Navegador	Consumo (W)	CPU prom. (%)
M. Edge	23,08	0,43
G. Chrome	22,77	0,41
M. Firefox	22,44	0,41

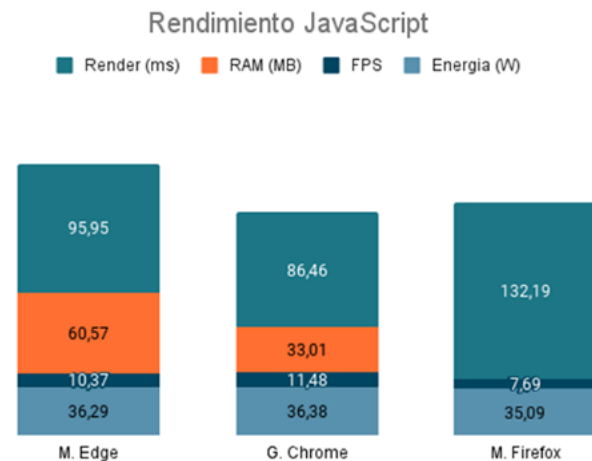
3.2 Consumo energético y rendimiento con JavaScript

En esta sección se analiza el comportamiento del *raytracer* cuando se ejecuta con JavaScript. Se observarán métricas clave de rendimiento y consumo energético en cada navegador, lo cual permite establecer una referencia que luego será comparada con la implementación en Rust/WebAssembly.

Al ejecutar el *raytracer* implementado en JavaScript, se observaron diferencias en el consumo energético y rendimiento entre los tres navegadores. Microsoft Edge, Google Chrome y Firefox

mostraron comportamientos similares, pero con algunas variaciones en los valores de FPS, consumo de RAM y tiempo promedio de renderizado.

Figura 3
Resultados del rendimiento de JavaScript



- **Consumo energético:** se observó un consumo energético similar entre Edge y Chrome; Firefox mostró un consumo ligeramente inferior.
- **FPS:** Google Chrome presentó un rendimiento superior en términos de FPS promedio (11,48 FPS), seguido por Edge (10,37 FPS), mientras que Firefox tuvo un rendimiento menor (7,69 FPS).
- **Uso de RAM:** Firefox no pudo reportar el uso de RAM durante estas pruebas, pero Edge mostró un consumo de memoria significativamente mayor (60,57 MB) en comparación con Chrome (33,01 MB).
- **Tiempo de renderizado:** Firefox presentó el tiempo de renderizado promedio más alto (132,195 ms), lo que podría explicar su menor rendimiento en FPS, mientras que

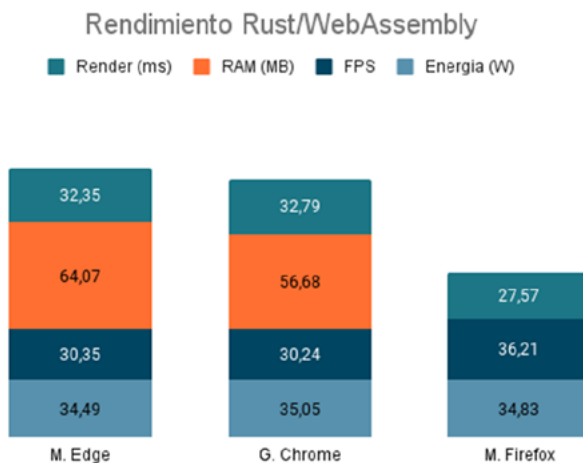
Edge y Chrome tuvieron tiempos mucho más bajos (95,95 ms y 86,46 ms, respectivamente).

3.3 Consumo energético y rendimiento con WebAssembly (Rust)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al ejecutar el *raytracer* utilizando Rust a través de WebAssembly, una tecnología emergente que promete mejoras en rendimiento y eficiencia. Esta sección detalla cómo se comporta el *raytracer* en esta configuración, comparando los resultados con los obtenidos previamente con JavaScript.

Las pruebas realizadas con el *raytracer* implementado en Rust mostraron una mejora notable en el rendimiento en comparación con JavaScript. El consumo energético fue menor y el número de FPS fue sustancialmente mayor en todos los navegadores.

Figura 4
Resultados del rendimiento de Webassembly



- **Consumo energético:** en términos de consumo energético, el uso de Rust resultó en una reducción en todos los navegadores en comparación con las pruebas en JavaScript. Edge tuvo el menor consumo promedio con 34,49 W, seguido por Firefox (34,83 W) y Chrome (35,05 W).

- **FPS:** los FPS promedio mejoraron significativamente en Rust. Firefox superó a los otros navegadores con 36,22 FPS, seguido de Edge (30,35 FPS) y Chrome (30,26 FPS).

- **Uso de RAM:** Edge utilizó más memoria (64,07 MB) que Chrome (56,68 MB), aunque estos valores son menores en comparación con la configuración JavaScript. Firefox no pudo reportar el uso de RAM.

- **Tiempo de renderizado:** el tiempo de renderizado promedio fue significativamente menor en todos los navegadores en comparación con JavaScript. Firefox fue el más rápido con 27,5 ms, seguido de Edge (32,35 ms) y Chrome (32,79 ms).

3.4 Comparación entre JavaScript y Rust

Finalmente, se realiza una comparación directa entre las implementaciones en JavaScript y WebAssembly (Rust). Esta comparación permite observar de manera clara las diferencias en términos de consumo energético, rendimiento y capacidad de procesamiento, por lo que ofrece una visión más completa.

Los resultados muestran una clara mejora en el rendimiento y eficiencia energética al utilizar Rust en lugar de JavaScript, lo que se alinea con las conclusiones de que Rust puede complementar a JavaScript en aplicaciones de alto rendimiento (Kyriakou y Tselikas, 2022). El consumo energético fue más bajo en general con Rust, y los FPS fueron notablemente superiores en los tres navegadores. Esto sugiere que Rust fue más eficiente para tareas intensivas en procesamiento, como el *raytracing*.

Tabla 2
Resumen del consumo obtenido

Métrica	JavaScript	Rust
Consumo (W)	35,92	34,79
FPS	9,85	32,94
CPU (%)	0,7	0,71
RAM (MB)	46,79	60,37
Render (ms)	104,87	30,21

Otro punto por destacar es la cantidad de datos capturados en el periodo de prueba de dos minutos en cada tecnología. En lo que respecta a WebAssembly (Rust), Firefox logró capturar 4527 datos (se puede hacer una similitud con la cantidad de ciclos procesados), seguido de Edge con 3917 y Chrome con 3822. Estos valores son considerablemente mayores que los observados en las pruebas con JavaScript, donde ningún navegador superó los 1500 datos capturados.

4. Discusión

Los resultados de esta investigación ofrecen una visión crucial sobre el impacto de las tecnologías JavaScript y WebAssembly con Rust en el consumo energético y el rendimiento de un *raytracer* ejecutado en navegadores web. A primera vista,

la diferencia en el consumo energético promedio entre ambos lenguajes puede parecer insignificante, con aproximadamente 1 W de diferencia. Sin embargo, al ampliar el enfoque más allá de la medición individual y considerar el contexto global, este hallazgo cobra una importancia considerable.

En solo dos minutos de pruebas, WebAssembly (Rust) logró procesar cerca de 4000 datos, lo cual supera ampliamente a JavaScript, que apenas alcanzó los 1500 datos. Este salto en la cantidad de datos procesados sugiere que WebAssembly no solo fue más rápido, como lo demuestran los resultados, sino que también fue significativamente más eficiente en la gestión de grandes volúmenes de información en cortos periodos de tiempo. Esto implica que, aunque la diferencia en el consumo energético promedio parezca pequeña, el hecho de que WebAssembly procese más información en el mismo intervalo indica una optimización sustancial en el uso de los recursos del sistema.

Para poner esto en perspectiva, imaginemos un escenario en el que millones de dispositivos a nivel mundial están ejecutando aplicaciones web intensivas, como un *raytracer*, con tecnologías basadas en WebAssembly. Incluso un ahorro de 1 W por dispositivo, multiplicado por millones de usuarios que acceden a la web cada día, resultaría en un ahorro energético masivo. Por ejemplo, si 1 millón de usuarios estuviera ejecutando simultáneamente una aplicación durante una hora, el ahorro de energía sería de 1 megavatio-hora (MWh), suficiente para abastecer a cientos de hogares durante ese mismo periodo.

Si extrapolamos estos números al uso diario de la web por miles de millones de dispositivos, desde *smartphones* hasta servidores, el impacto se amplifica exponencialmente. La adopción de

tecnologías como WebAssembly no solo mejoraría el rendimiento de las aplicaciones web, sino que también contribuiría a reducir el consumo energético global, y ayudaría a mitigar el impacto medioambiental derivado del uso extensivo de la tecnología.

Además, la capacidad de WebAssembly para ofrecer una experiencia de usuario más rápida y eficiente en dispositivos con limitaciones energéticas o de procesamiento subraya su valor en un ecosistema digital diverso. Dado que muchos usuarios interactúan con aplicaciones web en dispositivos que van desde teléfonos inteligentes hasta servidores en la nube, esta mayor eficiencia energética y de procesamiento se traduce en una mejor experiencia general, independientemente del tipo de dispositivo que utilicen.

En resumen, aunque una diferencia de I W en consumo energético pueda parecer mínima a nivel individual, el efecto acumulativo en el contexto de la web global es significativo. La adopción de tecnologías más eficientes como WebAssembly no solo beneficia a los usuarios finales en términos de rendimiento, sino que también puede generar un impacto positivo a gran escala en el ahorro energético y la sostenibilidad.

5. Conclusiones

Esta investigación resalta la importancia de explorar tecnologías emergentes como WebAssembly y su capacidad para mejorar el rendimiento y optimizar el consumo energético en aplicaciones web. Si bien el uso de JavaScript sigue siendo predominante debido a su versatilidad y amplia adopción, WebAssembly ha demostrado ser una alternativa más eficiente para ciertas tareas com-

putacionalmente intensivas, como lo es el *raytracing*.

El impacto de WebAssembly en la captura de datos y en el rendimiento energético es significativo, especialmente cuando se considera la creciente demanda de aplicaciones web que requieren alta capacidad de procesamiento, como simulaciones gráficas o videojuegos. La posibilidad de realizar más operaciones en el mismo periodo, con un incremento mínimo en el consumo energético, abre la puerta a su adopción en escenarios donde la eficiencia es clave, como en dispositivos de bajo consumo energético o redes de IoT.

Además, las diferencias observadas entre los navegadores revelan que aún hay espacio para optimizar el soporte para WebAssembly. Si bien Firefox mostró un mejor rendimiento en algunas métricas, es posible que futuras optimizaciones en motores como los de Chrome y Edge mejoren aún más la eficiencia de esta tecnología.

En términos de alcance, este estudio contribuye a la comprensión de cómo la elección de tecnologías puede influir no solo en el rendimiento de una aplicación web, sino también en su impacto energético. En un contexto global, donde el consumo energético de las aplicaciones web puede multiplicarse debido al alto número de usuarios y dispositivos conectados, los hallazgos de esta investigación ofrecen una base para futuras optimizaciones.

En conclusión, aunque esta investigación se ha limitado al caso de estudio de un *raytracer*, los resultados tienen implicaciones más amplias para el desarrollo de aplicaciones web de alto rendimiento. El uso de Rust con WebAssembly no solo ofrece mejoras en términos de procesamiento, sino que también permite un manejo más efi-

ciente de los recursos energéticos, lo que podría contribuir a un futuro más sostenible en la web.

Referencias

- S. Vikram, “Green computing,” 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Greater Noida, India, 2015, pp. 767-772, doi: 10.1109/ICGCIoT.2015.7380566.
- Rui Pereira, Marco Couto, Francisco Ribeiro, Rui Rua, Jácome Cunha, João Paulo Fernandes, and João Saraiva. 2017. Energy efficiency across programming languages: how do energy, time, and memory relate? In Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering (SLE 2017). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 256–267. <https://doi.org/10.1145/3136014.3136031>
- J. De Macedo, R. Abreu, R. Pereira and J. Saraiva, “WebAssembly versus JavaScript: Energy and Runtime Performance,” 2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S), Plovdiv, Bulgaria, 2022, pp. 24-34, doi: 10.1109/ICT4S55073.2022.00014.
- J. De Macedo, R. Abreu, R. Pereira and J. Saraiva, “On the Runtime and Energy Performance of WebAssembly: Is WebAssembly superior to JavaScript yet?,” 2021 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering Workshops (ASEW), Melbourne, Australia, 2021, pp. 255-262, doi: 10.1109/ASEW52652.2021.00056.
- Andreas Haas, Andreas Rossberg, Derek L. Schuff, Ben L. Titzer, Michael Holman, Dan Gohman, Luke Wagner, Alon Zakai, and JF Bastien. 2017. Bringing the web up to speed with WebAssembly. SIGPLAN Not. 52, 6 (June 2017), 185–200. <https://doi.org/10.1145/3140587.3062363>
- Demir, N., Große-Kampmann, M., Urban, T., Wressnegger, C., Holz, T., & Pohlmann, N. (2022, April). Reproducibility and replicability of web measurement studies. In Proceedings of the ACM Web Conference 2022 (pp. 533-544).
- Kyriakou, K. I. D., & Tselikas, N. D. (2022). Complementing JavaScript in High-Performance Node.js and Web Applications with Rust and WebAssembly. Electronics, 11(19), 3217.

Methodology for the Implementation of a Communications System Using Light Beams with Orbital Angular Momentum

Omar Javier Tijaro Rojas

Electronics Engineer, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
ojtijaro@uis.edu.co

Abstract

This paper shows a methodology that uses orbital angular momentum (OAM) in optical communication systems, whose objective is to test it on data transmission through fiber optics. The results obtained in the identification of 11 well-defined symbols using OAM are analyzed, as well as the limitations given in theoretical detection and the findings associated with detection. The article also reviews several key studies that contribute to the development and mitigation of problems such as modal coupling, optical turbulence, and interference between modes. The results suggest significant potential to increase transmission capacity, although detection remains a challenge in terms of speed.

Keywords: optical communications, symbol, OAM, propagation, simulation.

1. Introduction

Orbital Angular Momentum (OAM) has gained significant attention as a technique for enhancing transmission capacity in communication systems, particularly in optical channels, such as free-space

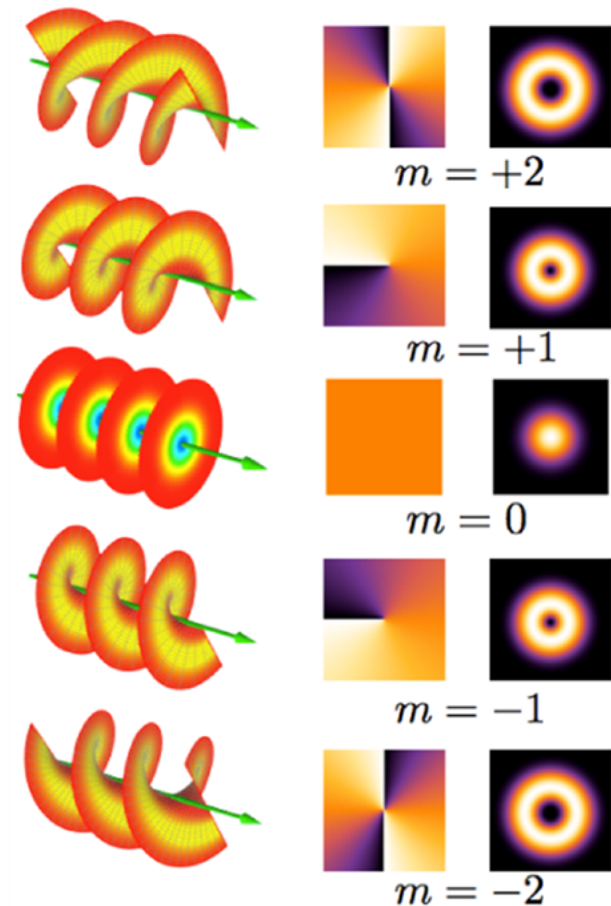
optical propagation. The ability of OAM to encode multiple signals in different modes allows for simultaneous transmissions, thereby increasing spectral efficiency. Despite its potential, OAM faces several implementation challenges, including difficulties in detection and maintaining the stability of modes in the presence of atmospheric disturbances and turbulence.

This article builds upon recent advancements in OAM for optical communications, highlighting key innovations and persisting challenges. Specifically, we present a novel approach to data transmission using OAM that demonstrates the feasibility of identifying up to 13 distinct symbols, albeit with extended detection times due to the complexity of the decoding process.

Orbital Angular Momentum (OAM) has garnered significant attention as a promising technique for enhancing communication capacity. OAM, characterized by the helical phase pattern of light beams, enables the use of multiple modes, each acting as an independent information channel (shown in Figure 1). This property has the potential to revolutionize telecommunications by allowing for higher data rates and improved spectral efficiency.

Figure 1

Behavior of a beam with orbital angular momentum. Rendering: 3D (left), phase (center), intensity (right)



Source: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helix_oam.png

In Figure 1 is shown m , its topological charge that presents different phase and an important characteristic in the center of beam, a hole that changes depending on m .

Despite its promise, the practical implementation of OAM in communication systems presents challenges. Turbulence and environmental

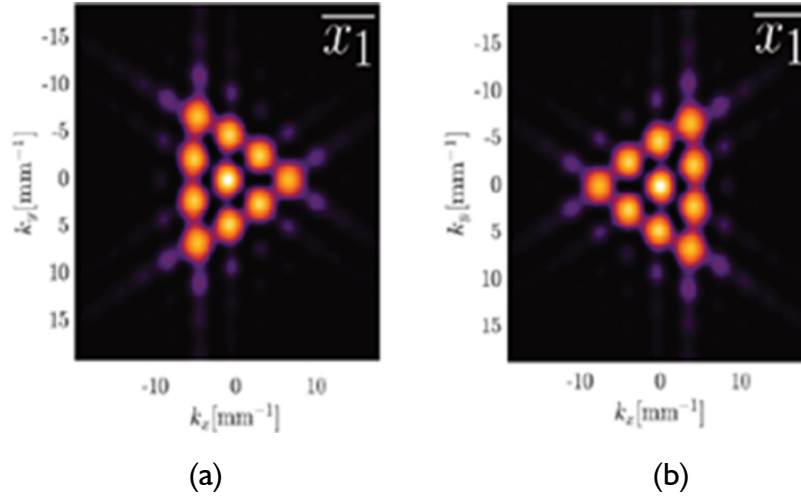
factors can cause modal coupling, leading to signal degradation. For instance, Song et al. (2022) investigated the causes of OAM modal coupling in dynamic turbulent environments, highlighting the need to mitigate modal interference in optical channels. Similarly, efforts to reduce crosstalk between OAM modes, as demonstrated by Yuan et al. (2022), are crucial for improving detection accuracy and minimizing errors in communication systems.

In addition to optical systems, the application of OAM has extended to radiofrequency communications. Xu et al. (2020) discuss recent advances in RF antennas that use OAM, showcasing the potential for this technology beyond the optical domain. Moreover, the development of high-efficiency mode generation techniques, such as those explored by Yadav, Upadhyay, and Prajapati (2021) using square patch elements, further enhances the capacity of OAM-based systems. Computational approaches also play a critical role in analyzing OAM modes, with Xiong et al. (2024) employing residual neural networks to improve multiplexing techniques and mode identification.

In local developments, several works have been presented, such as encoding based on light beams with Orbital Angular Momentum (Díaz-Meza, 2012). Additionally, simulations were carried out, and experiments were implemented to detect phase patterns (Gibson, 2004). Later, the phase was disaggregated from the intensity image (Mendoza-Castro, 2019), fabricating thin films that obstructed the beam's path. The behavior of its propagation generated diffraction with desirable characteristics in terms of intensity reception and its phase (triangular aperture, Figure 2).

Figure 2

Behavior of an OAM light beam through a triangular aperture. m used: (a) $m = +3$, (b) $m = -3$.
Source: (Mendoza-Castro, 2019)



This growing body of research demonstrates the significant potential of OAM in enhancing communication systems, although challenges in detection and modal interference remain areas of ongoing investigation.

2. Methodology

The primary objective of the proposed model is to generate images that represent different symbols using OAM waves and their corresponding topological charges, as illustrated in Equation (1).

$$\psi(x, y, z, m) = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \left(\frac{r}{\omega(z)} \right)^{|m|} e^{-\frac{r^2}{\omega(z)^2}} e^{im\theta} \cdot e^{-ikz - \frac{ikr^2}{2R(z)} + i(2m+1)\pi} \quad (1)$$

where:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \text{ radio of beam to a } z \text{ distance,}$$

$z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$ is the Rayleigh distance,

m is the topological charge (OAM),

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ is the radial distance,

θ is the azimuthal angle,

$R(z)$ is the radius of wavefront curvature,

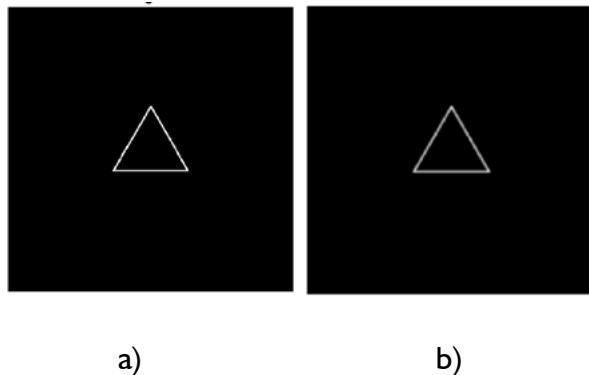
$k = 2\pi/\lambda$ is the wave number

Using Equation (1), the algorithm generates OAM beams for each topological charge, creating two beams: one corresponding to a positive charge and the other to a negative charge. These beams are subsequently stored for further analysis.

In (Mendoza-Castro, 2019) work triangular aperture was modeled with a hole triangle while here was a slit triangle and filtered through convolution with a Gaussian filter (see Figure 3).

Figure 3

Slit triangle a) original, b) filtered

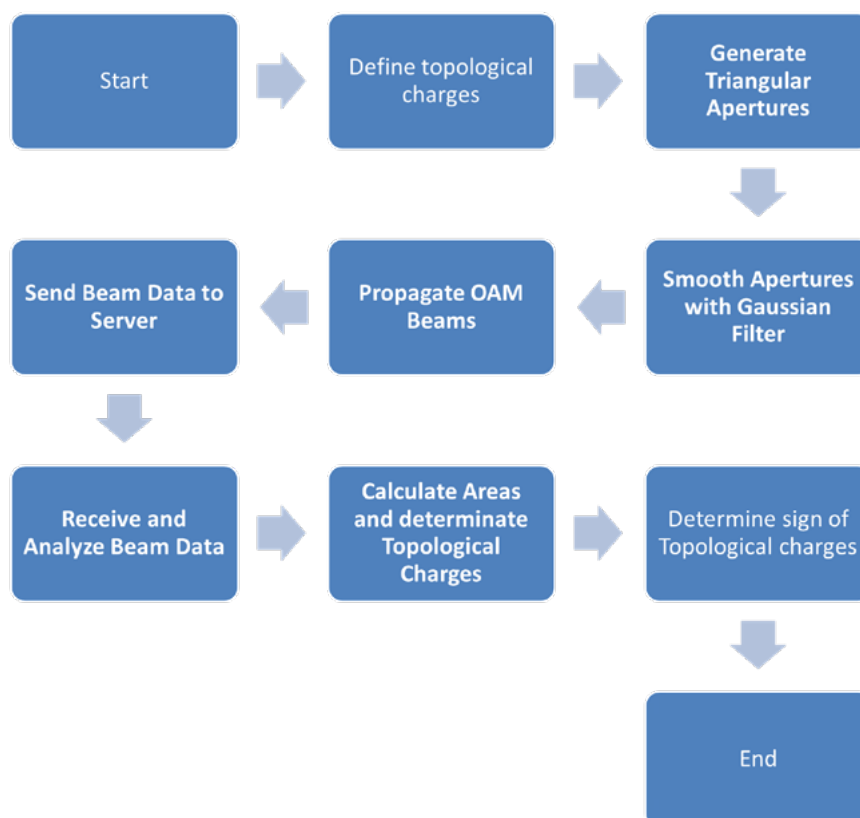


The generated OAM beams are then propagated through this aperture, and the resultant beam is propagated a z distance.

This method sends the resulting beams by TCP protocol to a server for analysis. The server receives and processes the magnitude of the beams, sending back responses (simulating a physical layer). Following this, the algorithm applies thresholding to the Fourier-transformed beams to isolate regions of interest based on intensity. These regions are analyzed to detect areas and signs of the beams, which are then compared to the corresponding topological charges. A flow of process is shown in Figure 4.

Figure 4

Flow diagram of process



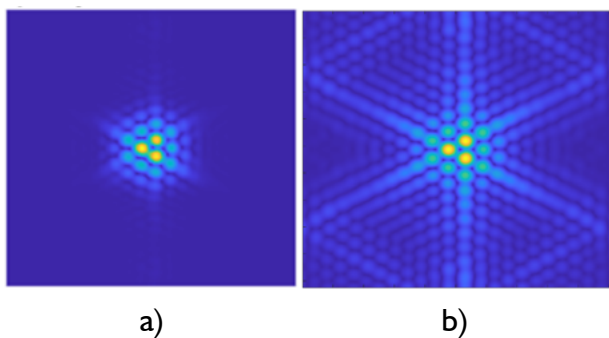
From Figure 4, on the block Receive and Analyze Beam Data, this server is designed to handle incoming image data, perform OAM decoding, and return a response to the client.

3. Results

Using Equation (1), 25 images were generated, each corresponding to an OAM mode with integer topological charges ranging from -12 to 12. These beams were propagated through both a triangular slit and a filtered triangular slit to enhance the lobules in the resulting propagation. As shown in Figure 5, the filtered triangular slit successfully reduces background intensity, allowing the image to focus more clearly on the central (yellow) lobules.

Figure 5

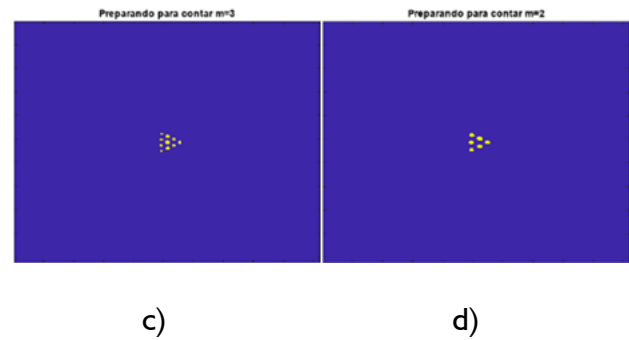
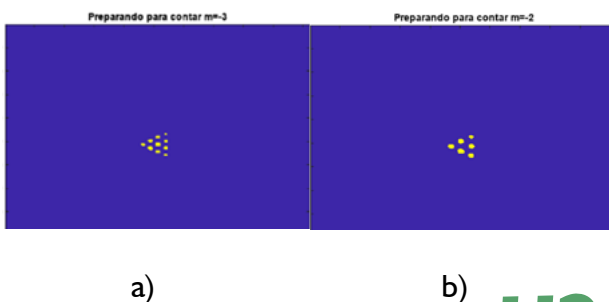
OAM wave with topological charge $m=-1$ propagated through a slit triangle. a) Filtered. b) Without filter



Through signal processing using the filtered triangular slit, the areas of the yellow lobules were identified after applying a threshold of to the normalized images. Figure 6 illustrates the thresholded images.

Figure 6

OAM wave propagated through a slit triangle and after thresholding operation. Topological charge: a) -3. b) -2. c) 3. d) 2



From Figure 6, it was easy count number of areas of lobules detected, and in some cases like $m=1$ or $m=0$ the number of areas corresponded to 3 or 1 and the number was not a correct number, but these were easy to detect, but in other cases like integers greater than 7 it was not distinguishable.

Table 1

Results of number of areas and topological charge decode

TC	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
P1	101	93	77	66	57	44	36	25	17	10	6	1
P2	10	10	9	8	8	7	6	5	4	3	2	1

TC	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
P1	90	79	67	62	49	36	30	19	10	6	1	0
P2	9	9	8	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Note: TC: Topological charge sent. P1: Count the number of areas. P2: Round of square root number of areas found.

From Table 1 is necessary to inform that $m=0$, I were exceptions in code, because areas were easy to calculate and these numbers have a different rule respect to square root, but number of areas detected for numbers like 2 to 8 were very close to square of the m sent. However, when were calculated the results were not easy to differentiate to . So, on that case, we could send 8 symbols.

Moreover, in Figure 6 are shown images with m positive and negative, so, it was developed an algorithm to identify sign that takes as input a binary image, BW, which contains a shape resembling a triangle. The objective was to identify whether the triangle is oriented to the right or to the left by analyzing the distribution of the object within the image. Taking in count Table 1, on Table 2 is shown topological charge and the sign identified.

Table 2

Results of orientation of areas found

TC	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
P3	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1

TC	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
P3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0

Note: TC: Topological charge sent. P1: Orientation calculated (-1 negative, 1 positive).

On Table 2 was crucial found to negative m the algorithm detected very well all the signs, but in positive, only were well detected from 0 to 6. Then, it was the second restriction due to that way in topological charge, but combining both restrictions, it is possibly understood that only could receive symbols from $m=-6$ to $m=6$, identifying clearly its absolute value and its phase (sign).

Evaluating that topic, in this research is demonstrated that it is possible to transmit 13 clearly identifiable symbols through an optical channel using OAM modes, and it would be implemented on optical fibers where the advance can significantly increase transmission capacity, allowing a greater number of symbols per cycle (five instead of one). However, the detection of these symbols, although effective, presents a longer delay compared to traditional methods that transmit bit by bit. This delay is due to the inherent complexity in identifying the modes but does not significantly affect the error rate.

4. Discussion

The results obtained show an important advance in transmission capacity using OAM, although it is necessary to continue improving detection techniques to make them faster and more efficient. The literature review suggests that advances in antenna design and in mitigating optical turbulence can help solve some of the current problems and some fiber implementation could improve capacity.

4.1 Ethical and Social Considerations

In the context of advancing communication technologies, it is important to ensure that research is conducted responsibly and with a focus on benefiting society. By utilizing Orbital Angular Momentum (OAM) in optical communications, it is possible to encode multiple data streams in a single beam, reducing the number of transmissions and, as a result, the overall energy consumption. This approach not only optimizes the use of resources but also reduces the environmental impact of high-capacity data transmission.

The efficiency gains from this approach are particularly valuable in sectors like healthcare, education, and emergency services, where reliable and energy-efficient communication can directly improve access to critical information. By reducing the energy required for data transmission, this research supports the development of sustainable infrastructures that serve the growing global demand for data while minimizing environmental harm. This alignment with both technological advancement and ethical responsibility ensures that the benefits of the research are directed towards improving the quality of life and supporting essential services for humanity.

5. Conclusions

OAM offers significant potential for enhancing transmission capacity in optical communication systems, but its practical implementation continues to face challenges, particularly in terms of detection speed and accuracy. While the solutions presented in recent studies are promising, further research is needed to fully optimize OAM-based communication systems.

Moreover, this work emphasizes the importance of reducing energy consumption in telecommunications systems by transmitting laser beams instead of individual symbols. This approach minimizes environmental impact and supports the development of more sustainable communication infrastructures.

Acknowledgements

To Universidad Industrial de Santander by the support of Research and Services Vice-chancellor VIE funding projects 3970 of the institutional program for probationary period.

References

- Díaz-Meza, C. F. (2012). Modelado de un sistema optoelectrónico para la codificación de información a través del momento angular orbital de la luz. [Master's thesis, Universidad Industrial de Santander].
- Gibson, G. C., Courtial, J., Padgett, M. J., Vasnetsov, M., Pas'ko, V., Barnett, S. M., & Franke-Arnold, S. (2004). Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Optics Express*, 12(22), 5448-5456. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005448>
- Mendoza-Castro, J. H. (2019). Data decoding of integer orbital angular momentum beams based in straight edge diffraction nanometric film. *Dyna*, 86(209), 170-179. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7029920>
- Song, H., Lu, P., & Guo, Y. (2022). Experimental investigation for the causes of orbital-angular-momentum modal coupling through a dynamic random turbulent medium. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 1-2. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9890669>
- Yuan, Y., Xiao, X., Liu, D., Fu, P., Qu, J., Gbur, G., & Cai, Y. (2022). Mitigating orbital angular momentum crosstalk in an optical communication uplink channel using cylindrical vector beams. *Waves in Random and Complex Media*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/17455030.2022.2053609>
- Xu, J., Guo, Y., Yang, P., Zhang, R., Zhai, X., Huang, S., & Bi, K. (2020). Recent progress on RF orbital angular momentum antennas. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 34(3), 275-300. <https://doi.org/10.1080/09205071.2019.1708814>
- Yadav, D., Upadhyay, M. D., & Prajapati, J. (2021). Redefining uniform circular array's limit by using square patch elements for higher-order orbital angular momentum mode generation. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.155110>
- Xiong, W., Huang, L., Wang, P., Xiao, J., Ye, H., Chen, S., Fan, D., & Liu, J. (2024). Spectral analysis of intricate orbital angular momentum modes in multiplexing communication using a residual neural network. *Optics Communications*, 560, Article 129584. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130488>

Evaluación de la integridad de un material polimérico como revestimiento interno durante la inyección de CO₂ en proyectos CCS (Carbon Capture & Storage)

José Luis González Tolosa

Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

jose2238047@correo.uis.edu.co

Resumen

En los proyectos de CCS, la inyección de CO₂ genera altos costes debido al daño de las tuberías metálicas por corrosión. Por el contrario, los materiales no metálicos como el polietileno de alta densidad (PE100) presentan una alta resistencia a gases ácidos, además de una baja densidad, y buena flexibilidad. Sin embargo, no se han realizado pruebas sobre el PE100 que simulen condiciones de fondo de pozo, para integrarlo como un *Liner* que permita prolongar la vida útil de las tuberías para las condiciones de inyección de CO₂. A través de pruebas internacionales estándar (ASTM y UL) para materiales, se evaluó la permeación, el envejecimiento acelerado por calor y una prueba neumática (*leak test*) del sistema dual acero-polímero aplicado por el método *compress-fit*, con la finalidad de evaluar la integridad del material para su integración en proyectos de CCS. Los coeficientes de permeación de CO₂ se determinaron mediante medición directa por el método de difusión de membrana/tiempo y la prueba neumática que concluye como evaluación final para las condiciones de integridad en pozo.

Palabras clave: CO₂, CCS, Liner, corrosión, PE100.

1. Introducción

Para reducir el efecto invernadero en la atmósfera se emplea la inyección de CO₂ en proyectos de CCS. La inyección del dióxido de carbono en los yacimientos alcanza rangos de presión y temperatura específicos, denominados como estado super crítico, que corresponden a valores de presión de 1070 psi y 32 °C (Fam y Fam, 2024).

Sin embargo, durante la administración en fondo de pozo, el gas puede mezclarse con agua y generar tasas de corrosión muy elevadas. Para mitigar los efectos de la corrosión interna, se emplean materiales no metálicos como el polietileno de alta densidad (PE100), como una camisa interna (*Liner*), el cual se ha implementado para líneas transporte en superficie, donde el PE100 funciona como una barrera interna físico-química. No obstante, hay poca evidencia de pruebas que garanticen su integridad para condiciones de fondo de pozo en sistemas de inyección de CO₂.

Los materiales poliméricos presentan especial afectación por la luz ultravioleta, el calor y gases muy finos que puedan permear su estructura. Adicionalmente, para implementar un material polimérico dentro de una tubería metálica, se deben seguir los parámetros designados por normas estándar de la industria (ASTM), como se aprecia en la figura 1. Según los parámetros de la ecuación 1.

Figura 1
Diseño prueba permeación

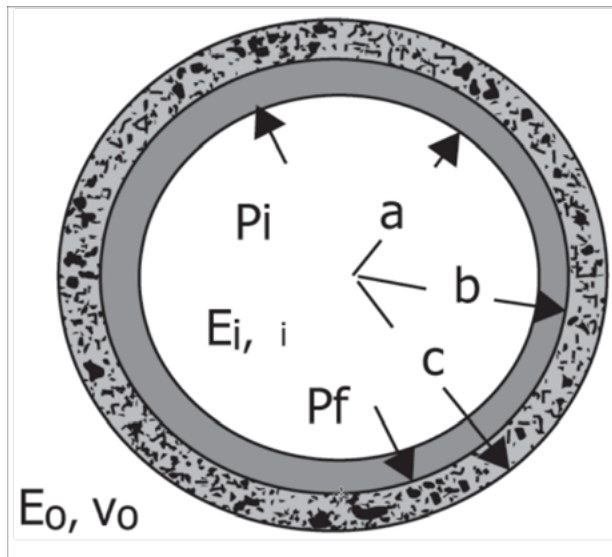


Figura 1: esquema de tubería anfitriona como una pared dual, para un tubo compuesto está sometido a una presión interna, p_i , donde se genera una presión radial interfacial (p_f), a partir de estos parámetros, puede calcularse la tensión de aro máxima Según ecuación 1. Donde: $R_i = b/a$, $R_o = c/b$, como las relaciones R de los radios respectivos, a = el radio hasta el ID del cilindro interior, b = el radio hasta el límite interfacial, c = el radio hasta el diámetro exterior del tubo compuesto. Fuente: tomado de ASTM- F3508-21a.

$$p_f = \frac{2p_i}{(E_i (R_i^2 - 1) \left(\frac{1}{E_i} \left(\frac{R_i^2 + 1}{R_i^2 - 1} \right) v_i \right) + \frac{1}{E_o} \left(\frac{R_o^2 + 1}{R_o^2 - 1} \right) v_o)} \quad (1)$$

2. Metodología

2.1 Tablas y figuras

Para esta investigación se realizó una adaptación en el análisis de materiales poliméricos frente a permeación, envejecimiento acelerado por calor y resistencia neumática (*leak test*) como material compuesto por el método *compress-fit* en un sistema de pared dual acero-polímero (ASME B31.3-2010, ASTM D3045-2003, ASTM F2786 – 16-2021, UL 746B-1996).

La prueba de permeación por CO_2 se lleva a cabo mediante un arreglo experimental a escala laboratorio, según la norma UL 746B (1996) y la adaptación de gases de permeación de López-González *et al.* (2020), como se presenta en la figura 2.

Adicionalmente, la prueba está sustentada en la ecuación 2 de permeabilidad para una sección transversal de una membrana.

$$Pe = \frac{Q \cdot l}{(A \cdot t \cdot \Delta P)} \quad (2)$$

Donde Q es el volumen de gas permeado a través de la membrana, en condiciones estándar (STP), l es el espesor medio de la membrana, A es la sección transversal de la membrana expuesta al gas, t es el tiempo transcurrido y ΔP es la diferencia de presión a través de la membrana. A su vez, está relacionada con la ecuación 3.

$$Q = \frac{V (p_{final} - p_{inicial})}{(p_{STP})} \quad (3)$$

Donde V es el volumen que ingresa en la cámara 2, ρ_{STP} es la densidad en condiciones estándar, ρ_{final} es la densidad del gas a la temperatura y presión finales, y $\rho_{inicial}$ es la densidad del gas a la temperatura y presión iniciales (inicio de la prueba).

Figura 2
Diseño prueba permeación

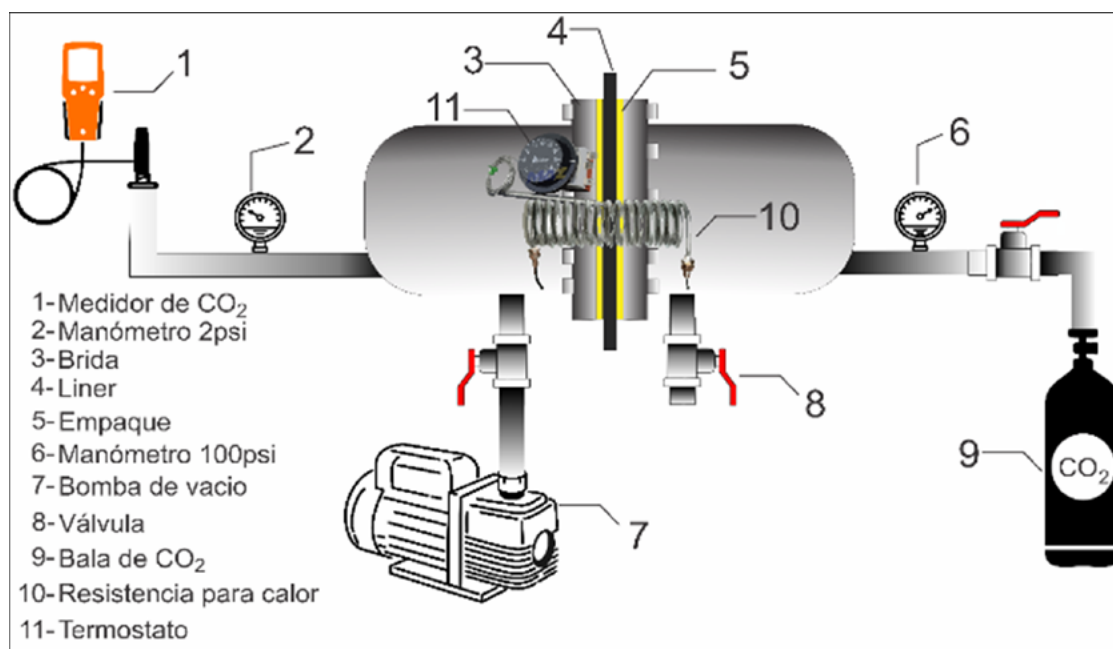


Figura 2: diseño adaptado para la prueba de permeación de CO₂, en una membrana del Liner polimérico por el método de difusión de membrana con temperatura controlada/ Fuente: tomado y modificado de norma UL 746B (1996) y López-González et al. (2020) para evaluación de materiales poliméricos y pruebas de permeación.

Para valorar el comportamiento del Liner polimérico por medio de una prueba de envejecimiento acelerado por calor, se realiza un triplicado de la prueba, con rangos de temperatura que van desde los 80 a 90 °C, según las normas ASTM D3045 (2003) y UL 746B (1996), según el diseño presentado en la figura 3.

Para la realización de la prueba neumática, se debe, mediante una *roller-box*, instalar el Liner polimérico para una tubería de acero al carbono API-5L de 85 cm de longitud, 6 pulgadas schedule 40. Según la norma ASME B31.3-2010.

Figura 3
Diseño prueba envejecimiento acelerado por calor

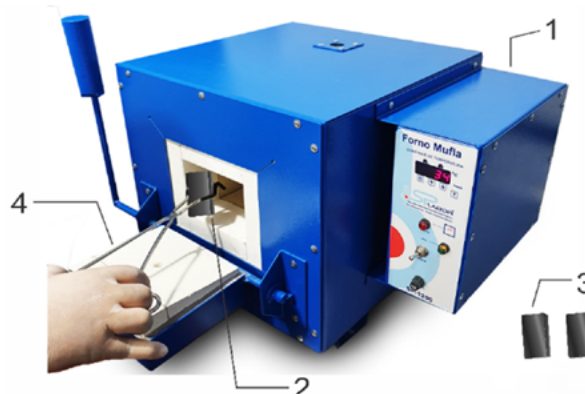


Figura 3: esquema del arreglo experimental para envejecimiento acelerado por calor a una sección del Liner polimérico. Componentes: 1 Mufla; 2 secciones de Liner analizar; 3 secciones adicionales; 4 pinzas metálicas. Fuente: tomado y modificado de normas UL 746B (1996) y ASTM D3045 (2003) para evaluación de materiales poliméricos.

Posteriormente, se debe conectar el sistema de pared dual acero-polímero al manifold, el compresor, el manómetro de alta presión y el monitor, según el diseño de la figura 4.

Figura 4

Diseño prueba neumática con CO₂

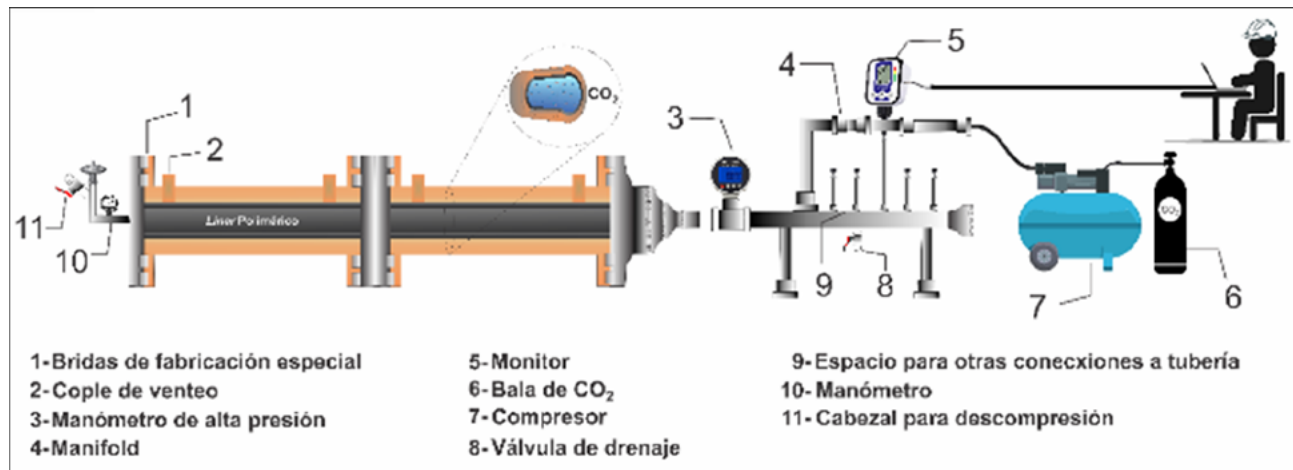


Figura 4: esquema del arreglo experimental para prueba neumática de CO₂ con *Liner* polimérico como revestimiento interno de tubería de acero al carbono. Fuente: tomado y modificado de normas ASME B31.3 (2010) y ASTM F2786 – 16 (2021) para pruebas neumáticas con polímeros como revestimiento.

Finalmente, mediante el operario a distancia, se debe activar el compresor para llevar la prueba con CO₂ a 1070 psi, con aparente temperatura constante (33 °C). Cuando se alcance una estabilización del sistema, determinada por una evaluación visual en el monitor, se debe generar un retraso (tiempo de espera), para lentamente generar la descompresión.

3. Resultados

La toma de permeación para las secciones del *Liner* se realizó con una modificación en la medición (*time lag*). Los datos se recopilaron a partir de la toma directa de un medidor de ppm en la

cámara 2, y los datos se extrapolaron a volúmenes en milímetros (mm).

La presión (STP) corresponde a presiones estándar de 1 atm. No obstante, se presenta una ligera desviación en los datos de permeación de los 3 *plugs*, para las temperaturas más altas, como se puede apreciar en la tabla 1.

Esto puede deberse a imperfecciones en la estructura interna del material al momento de fabricación o a su parcial degradación, pero que no incrementan altamente los valores de permeación del dióxido de carbono. Adicionalmente, no se exponen cambios fuera de los márgenes de incertidumbre para valores bajos de temperatura.

Tabla 1

Resumen de permeación por difusión de membrana en polietileno de alta densidad frente al CO₂ para temperaturas controladas

Muestra	Temperatura	permeación (mm ³ /2,5 años)* P (STP)	espesor +/- 0,05 (mm)
1 Plug	40	1,2	2,03
	60	1,3	1,98
	80	1,7	2,02
	90	1,8	1,97
2 Plug	40	1,15	2,01
	60	1,3	1,98
	80	1,63	2,04
	90	1,6	1,96
3 Plug	40	1,13	2,03
	60	1,25	1,98
	80	1,55	2,05
	90	1,5	1,96

Por otra parte, el desarrollo de la prueba neumática se lleva en etapas, cada una del 25 % de presión máxima (1 000 psi). Se mantiene presurizada por 3 horas. Terminada la actividad se despresuriza lentamente durante 50 minutos por los extremos de la línea, con flujos iguales, con válvulas de aguja para que su despresurización sea igual por los extremos de tubería (ver figura 6).

Finalmente, se está a la espera de los resultados del comportamiento acelerado por calor para los *plugs* del *Liner* previamente preparados.

4. Discusión

El PE100 posee la capacidad de soportar altas presiones, condiciones corrosivas y de permeación para temperaturas elevadas (80-90 °C) sin que se vea una alteración considerable en su integridad. Sin embargo, existen otros materiales utilizados en la industria para evitar la oxidación de las líneas que inyectan CO₂, como fibra de vidrio, aleaciones de aceros especiales, pinturas e

inhibidores de la corrosión. Por su parte, la fibra de vidrio soporta mayores rangos de temperatura, pero posee el inconveniente de ser frágil. En segundo lugar, las aleaciones resistentes a la corrosión tienen un menor tiempo de vida útil en presencia de gases ácidos, hasta 10 veces menos comparados con sus contrapartes no metálicas, y elevados costes, pero tienen la ventaja de una mayor resistencia a la presión.

En tercer lugar, las pinturas aislantes presentan buena resistencia a la corrosión, aunque no son eficientes cuando los materiales se encuentran con plegamientos o inclinaciones, que, debido a su bajo espesor (micras), se traduce en grietas o puntos de acumulación de corrosión. Finalmente, los inhibidores de la corrosión son efectivos solo para un rango específico de pH, el cual puede cambiar en el tiempo debido a la química del yacimiento, además de presentar elevados costes debido a los volúmenes del fluido inyectado (Bukhari *et al.*, 2020; Duarte-Poveda *et al.*, 2019; Duthie *et al.*, 2019; Villamizar y Grimaldos, 2021; Zhao *et al.*, 2014)

5. Conclusiones

Los valores de permeabilidad de CO₂ presentaban pocas variaciones a partir de los 60 °C hasta la temperatura similar a fondo de pozo (80-90 °C), para los *plugs* (sección de *Liner*) analizados que poseen 2 mm de espesor y área transversal de 20 cm².

El uso de PE100 como un revestimiento interno (*Liner*) en la prueba de fuga (neumática) a condiciones de inyección de CO₂ (1070 psi), no presenta deformaciones o ampollas posterior a la descompresión de la prueba. Es importante resaltar que debido a la modificación de las especificaciones de la norma ASTM-F3508-21a se obtuvo un material compuesto con mejores propiedades de resistencia a presión, en el sistema dual acero-polímero.

Agradecimientos

A la empresa REDO S. A. S., que ha sido el eje principal, debido a su apoyo técnico-económico, lo cual fijó los cimientos para el desarrollo y evaluación de un producto innovador. Al doctor Darío Yesid Peña, quien a través sus conocimientos de corrosión en la ciencia de materiales permitió enfocar la investigación.

Referencias

- ASTM D3045-92(2003) Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load. <https://www.astm.org/d3045-92r03.html>
- ASTM F3508-21a-Standard guide for in-situ pipeline renovation as dual-wall composite pipeline by push/pull installation of compressed-fit shape-memory-polymer tubular (SMPT) [tps://compass.astm.org/document/?content-Code=ASTM%7CF3508-21A%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?content-Code=ASTM%7CF3508-21A%7Cen-US)
- Bukhari A. O., Mohammad B., Aramco S., Aladawy A. S., Goh S. L., Sarmah P., Hughes B. (2020, February). Review of non-metallic pipelines in oil & gas applications - challenges & way forward. Doi: 10.2523/IPTC-22301-MS
- Duthie, L., Almarri, H., Saiood, H., Lata, A., & Radhakrishnan, G. (2019, April). Effective Corrosion Mitigation Exploiting Glass Reinforced Epoxy Lined Tubulars in Offshore Producing & Injection Wells. In Offshore Technology Conference (p. D041S048R004). OTC. <https://doi.org/10.4043/29266-MS>
- Duarte-Poveda, G. I., Valera-Rosales, M. M., Manrique-Rojas, M., & Mateus-Barragán, M. (2019). Evaluation and implementation of high-density polyethylene Liner: Alternative of solution to corrosion-wear problems in flowlines. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 9(1), 65-72. <https://doi.org/10.29047/01225383.153>
- Fam, A., & Fam, S. (2024). Review of the US 2050 long term strategy to reach net zero carbon emissions. Energy Reports, 12, 845-860. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.031>
- López-González, M., Flores, A., Marra, F., Ellis, G., Gómez-Fatou, M., & J. Salavagione, H. (2020). Graphene and polyethylene: A strong combination towards multifunctional nanocomposites. Polymers, 12(9), 2094. <https://doi.org/10.3390/polym12092094>
- UL 746B Ed. 3-1996 Standard for Polymeric Materials - Long Term Property Evaluations. <https://webstore.ansi.org/standards/ul/ul-746bed1996>

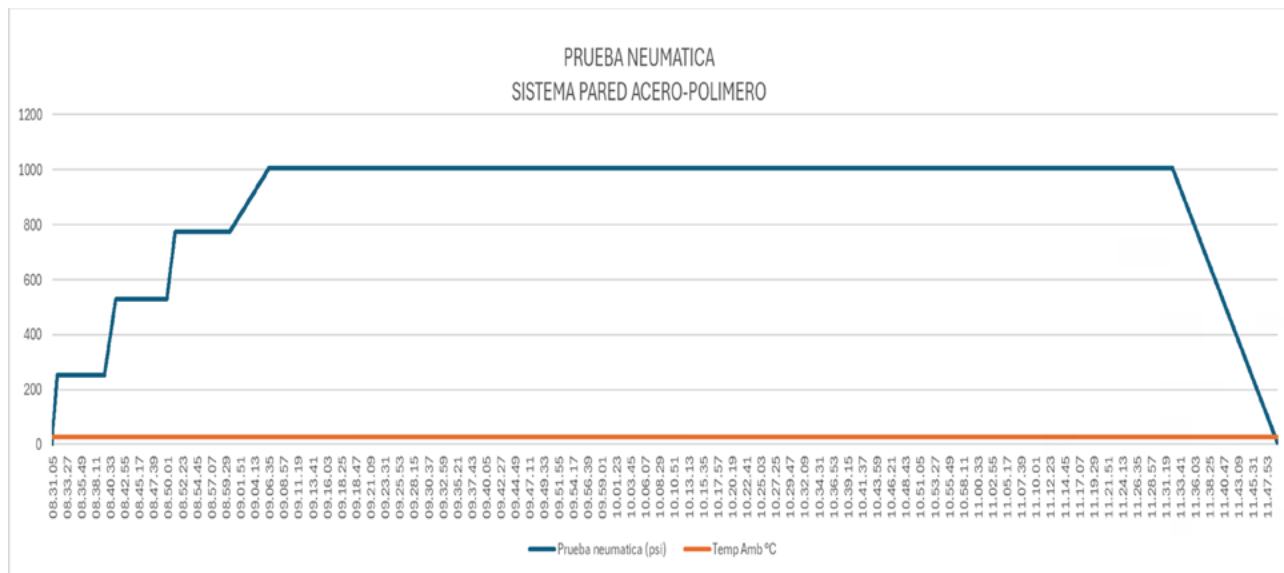
Villamizar, J. P. C., & Grimaldos, E. F. A. Estudio conceptual de la corrosión en tuberías de aceros al carbono para procesos de Captura y almacenamiento de CO₂ (CCS). (2021). International Journal of Greenhouse Gas Control, 31, 48. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/40947>

Zhao, L., Ren, J. X., Dunne, T., Li, J. Y., Cheng, P., & Qi, C. Y. (2024, April). Cost effective anti-corrosion strategies for replacing corrosion-resistant alloys CRA in CCUS injection wells. In Offshore Technology Conference (p. D031S040R006). OTC. <https://doi.org/10.4043/35034-MS>

ANEXOS

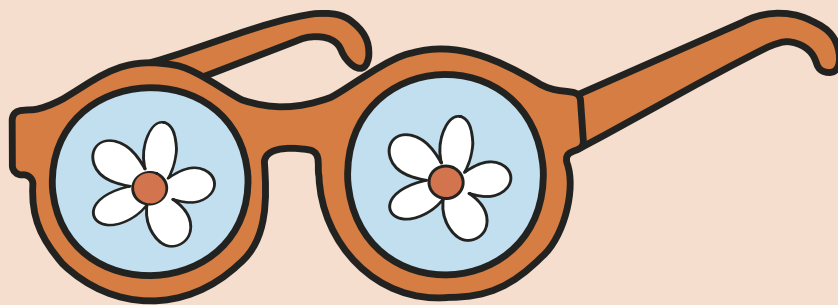
Figura 6

Resultados prueba neumática a 33 °C en sistema pared dual acero-polímero





**ciencias sociales,
desarrollo humano y
cultural con equidad**



Lesiones de rodilla en lucha estilo libre. Una revisión sistemática

Santiago José Ochoa carrillo

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander, Colombia, Santiago2248262@correo.uis.edu.co

Jhonny Alexander Arias Berdugo

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander, Colombia, Jhonny2248277@correo.uis.edu.co

Diana Marcela Suárez

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander
Diana2248264@correo.uis.edu.co

Fabio Villafrades González

Departamento de Educación Física y Deportes, Universidad Industrial de Santander, Colombia, villafra@uis.edu.co

Resumen

Esta revisión sistemática tiene como objetivo identificar la incidencia, los tipos de lesiones y las estrategias de prevención y rehabilitación relacionadas con las lesiones de rodilla en la lucha olímpica estilo libre. La síntesis abarca estudios desde el año 2000 hasta 2024, con una revisión sistemática en bases de datos indexadas (Scopus, Web of Science y Pub Med). Se realizó la selección y sistematización siguiendo el protocolo Prisma; se seleccionaron 14 estudios de mayor importancia en los que se registra la incidencia de las lesiones más frecuentes de rodilla en la lucha estilo libre, y se identificaron protocolos de rehabilitación y prevención de las lesiones de rodilla más frecuentes (rotura de ligamento cruzado LCA, meniscos y esguinces).

Palabras clave: lucha olímpica, lesiones, incidencia.

1. Introducción

La lucha olímpica es un deporte de combate que implica contacto físico por medio de cargadas, derribadas, agarres, etc. Es catalogado por la ciencia como un deporte “peligroso” (Bromley, 2018). Siguiendo el artículo de Agarwal y Mann (2006), en Piussi et al. (2024), al ser la lucha olímpica un deporte de alta exigencia física, los atletas llevan su cuerpo al límite hasta llegar a una tasa de exposición a lesiones de 19,6/1000 horas.

La rodilla, en particular, es una articulación muy vulnerable ante una variedad de lesiones, debi-

do a los movimientos repetitivos, las cargas de peso y las fuerzas de torsión involucradas en las técnicas de lucha (Dennis Caine *et al.*, 2008). La literatura científica ha documentado diversas lesiones de rodilla en luchadores olímpicos, incluidos esguinces, desgarros de ligamentos cruzado anterior y colateral interno, cápsula posterior y meniscopatías y fracturas (Bonza *et al.*, 2009). Sin embargo, existe la necesidad de una revisión sistemática que sintetice estos hallazgos y proporcione una visión integral del panorama actual. Además, una revisión sistemática puede contribuir a la elaboración de protocolos de entrenamiento y prevención más seguros y eficaces para los atletas (Almeida *et al.*, 2019).

De acuerdo con la necesidad de sistematizar los estudios sobre las afecciones de rodilla en el deporte, el presente estudio tiene como objetivo conocer los tipos, causas y factores que ayudan a evitar las lesiones de rodilla en la lucha olímpica estilo libre, por medio de la revisión sistemática; se hace una selección y revisión de artículos científicos en revistas indexadas.

2. Metodología

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión establecidos en la búsqueda de la bibliografía fueron: a) artículos científicos sobre las lesiones de rodilla y prevención de la herida revisada, b) artículos que analizaran la incidencia de lesiones de rodilla en los luchadores y mecanismos de prevención para un óptimo rendimiento, c) artículos sobre temas científicos similares al objetivo de este estudio en deportes de combate “judo”.

Selección de artículos para revisar

Se realizó una búsqueda sistemática utilizando bases de datos bibliográficas como PubMed, Scopus y Web of Science. La ecuación de búsqueda o palabras claves utilizadas fueron “wrestling” “knee” “Olympic” “injuries”.

Para la selección, evaluación y síntesis de artículos con la ecuación de búsqueda (lesiones, rodilla, lucha olímpica, etc.) se usó la declaración PRISMA 2020; se identificaron en cada base de datos ya mencionada la cantidad de artículos registrados y se sintetizaron en un número específico los estudios elegidos para analizarlos.

Después de generar la ecuación de búsqueda y la declaración PRISMA, dos revisores utilizaron los criterios de inclusión y exclusión prespecificados para evaluar de forma independiente cada referencia mediante un proceso de tres etapas. La primera etapa fue revisar títulos; la segunda, revisar resúmenes; y tercera, revisar el texto completo de los artículos potencialmente elegibles.

Los estudios que cumplieron con los criterios de inclusión en la evaluación del texto completo se ubicaron en un documento del programa Microsoft Excel para su análisis cuantitativo. El documento fue diseñado teniendo como referentes científicos el formulario de revisión crítica: estudios cuantitativos de Law *et al.* (1998), que permitió excluir diversos estudios, si no era posible identificar el deporte.

Este archivo permitió dar un sistema de puntuación al artículo de cero a catorce (0/14), una puntuación de 1 = SÍ y 0 = NO, donde los artículos que obtuvieron un resultado mayor o igual a 8/57 % fueron usados en la revisión.

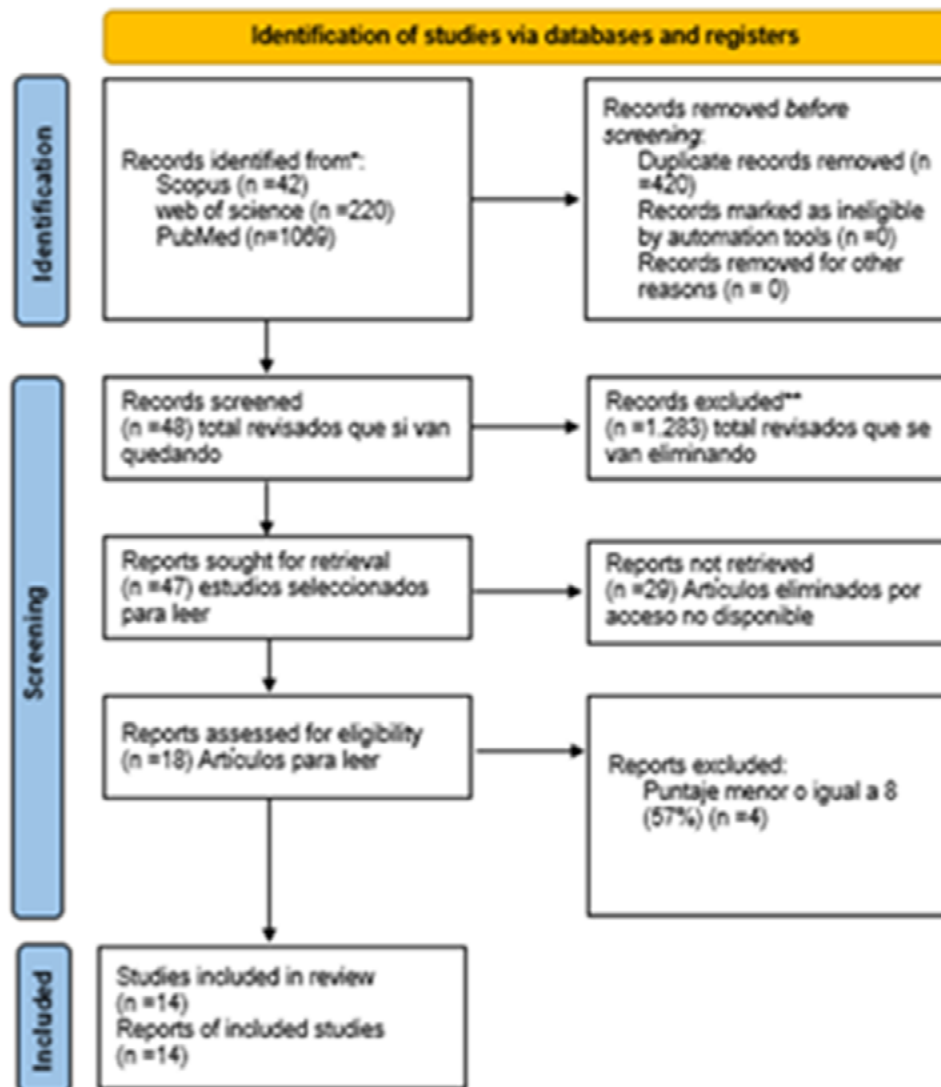
Estado actual del tema

El procedimiento de investigación ha permitido determinar que, actualmente, en tres bases de datos reconocidas científicamente, aparecen

1331 artículos. En primer momento, se sintetizaron, mediante la declaración de PRISMA 2020, 48 estudios relacionados con las lesiones de rodilla o estrategias de prevención en la lucha olímpica.

Figura 1

Diagrama de flujo de los procesos de selección y análisis de estudios



*Consider, if feasible to do so, reporting the number of records identified from each database or register (total number across all databases/register).

**If automation tools were used, indicate how many records were excluded by a human and how many by automation tools.

3. Resultados

Estudio de selección

Después de una búsqueda sistemática que se centró selectivamente en artículos científicos, estudios transversales y estudios prospectivos, se recuperaron 42.220 artículos de Scopus y 1069 de Web of Science. Durante la fase de selección se excluyeron 1283 artículos que no presentaban características sobre las lesiones de rodilla y prevención de la lesión revisada. De los 1331 artículos encontrados, 420 se encontraban repetidos entre las tres bases de datos. Posteriormente, se analizó el título, resumen y propósito; para sintetizar los estudios, fueron seleccionados 48 artículos.

Estos 48 estudios fueron analizados en las bases de datos, de los cuales un artículo fue eliminado porque no brindó características o antecedentes justificados sobre las variables estudiadas. De estos 47 artículos seleccionados fueron eliminados 28 que no eran de acceso al público en sus revistas, lo que dejó 19 para la respectiva lectura y análisis.

En el Excel cuantitativo diseñado para sintetizar la selección de los artículos, se excluyeron según el puntaje de revisión cuantitativa, de tal manera que los de puntaje inferior o igual a 8 fueron excluidos por no cumplir con los parámetros solicitados de un artículo científico; finalmente, se seleccionaron 14 artículos en la revisión sistemática.

Se analizó un artículo y, de acuerdo con el formato de revisión crítica, se excluyó, porque no cumplió la calidad metodológica y puntuación en los ítems seleccionados.

Características de los estudios incluidos

Dentro del estudio se incluyó 1 de karate (Tabben *et al.*, 2023) y 1 de judo (Blach *et al.*, 2021). Se analizaron 3 estudios de rehabilitación para la prevención de lesiones en extremidades inferiores y 9 de 14 estudios fueron artículos sobre mecanismo y estrategias para la prevención de algunas lesiones y tipos de lesiones de rodilla en la lucha olímpica estilo libre (Isaac *et al.*, 2005; Konnyu *et al.*, 2023; Ebert *et al.*, 2014).

Análisis informado de los datos sobre las lesiones

Las lesiones en la lucha olímpica se clasifican en tres grupos: lesiones leves, lesiones moderadas y lesiones catastróficas. Según el estudio de Bromley *et al.* (2018), el 84,4 % de las lesiones en lucha olímpica eran leves, y los estudios encontrados en el presente estudio determinan que la lesión de rodilla es una de ellas; su incidencia oscila entre el 9,7 % y el 21,8 %, donde la rodilla es la parte del cuerpo más lesionada por localización.

Se pueden encontrar distintos estudios que determinan la incidencia de la lesión de rodilla en luchadores olímpicos estilo libre, como el estudio de Agarwal y Mann (2016), donde se determinó que, de 188 atletas observados, el 37,77 % (71/188) presentaron lesión en la rodilla. En otros estudios como Shadgan *et al.* (2010) y Piuissi *et al.* (2024) también se observó la incidencia de lesiones en la rodilla de los luchadores.

La rodilla, el hombro y el codo son las localizaciones anatómicas más propensas a sufrir lesiones con un 20 % de todas las lesiones que se producen en las extremidades superiores, y un 30 % en las extremidades inferiores.

Finalmente, la flexión activa media de la rodilla mejoró significativamente en todos los pacientes, desde 90,4 grados, en la visita ambulatoria inicial (1-2 semanas), hasta 110 grados en la visita ambulatoria final (7 semanas).

4. Discusión

Esta revisión sistemática proporciona una visión detallada de la incidencia, tipos y estrategias de prevención de lesiones de rodilla en la lucha olímpica estilo libre. Los hallazgos indican que las lesiones más comunes incluyen desgarros del ligamento cruzado anterior (LCA) y meniscopatías, que están en línea con las observaciones de estudios previos (Dennis Caine *et al.*, 2008; Bonza *et al.*, 2009).

En comparación con la literatura existente, los hallazgos coinciden con los estudios de Kordi *et al.* (2011), porque reportaron una alta incidencia de fracturas y dislocaciones en luchadores de estilo libre. Sin embargo, algunos estudios incluidos, como los de Bromley *et al.* (2018), encontraron tasas de exposición a lesiones ligeramente inferiores, posiblemente debido a diferencias en los protocolos de recopilación de datos o en la definición de lesiones.

Relevancia clínica y práctica: los resultados destacan la necesidad urgente de programas de prevención específicos para luchadores de estilo libre. La implementación de ejercicios de fortalecimiento y estabilización de la rodilla, como se sugiere en Almeida *et al.* (2019), puede reducir significativamente la incidencia de lesiones. Estas intervenciones deben ser adaptadas a las demandas específicas del deporte para ser efectivas.

Limitaciones del estudio: una limitación importante de esta revisión es la heterogeneidad en

los diseños de estudio y en los criterios de diagnóstico de lesiones entre los artículos revisados. Además, algunos estudios pueden estar sujetos a sesgos de publicación, lo que podría afectar la interpretación de los resultados.

Es necesario realizar más investigaciones que evalúen la efectividad de programas de prevención y rehabilitación específicos en diferentes poblaciones de luchadores. También se deben explorar intervenciones dirigidas a la reducción de factores de riesgo específicos, como la fatiga muscular y la biomecánica de las técnicas de lucha.

5. Conclusiones

Esta revisión sistemática brinda una muestra analítica de la incidencia, tipos y prevención de las lesiones de rodilla en la lucha olímpica estilo libre. Los resultados indican que las lesiones de rodilla —lesión de ligamento cruzado anterior (LCA), meniscopatías y fracturas—, prevalentes entre los luchadores, están relacionadas con las deficiencias biomecánicas y exigencias físicas del deporte. La alta incidencia de estas lesiones subraya la necesidad de intervenciones preventivas y programas de rehabilitación específicos para reducir la morbilidad entre los atletas.

Los programas de prevención que se centran en el fortalecimiento muscular, la estabilización de la rodilla y la mejora de la biomecánica son esenciales para mitigar el riesgo de lesiones (Almeida *et al.*, 2019). Además, la rehabilitación postlesión debe adaptarse a las demandas específicas del deporte para garantizar un retorno seguro y efectivo a la competencia (Kordi *et al.*, 2011).

Finalmente, este estudio brinda un aporte para mejorar la seguridad y el rendimiento de los luchadores de estilo libre, contribuye a la creación

de programas para prevenir la incidencia de lesiones de rodilla en atletas de lucha y mejora el rendimiento deportivo.

Referencias

- Agarwal, S., & Mann, E. (2016). Knee injuries in wrestlers: A prospective study from the Indian subcontinent. *Asian Journal of Sports Medicine*, 7(4). <https://doi.org/10.5812/asjrm.35000>
- Almeida, S. A., Stephanie K., Shaffer, R. A., & Brodine, S. K. (2019). Epidemiological patterns of musculoskeletal. *Medicina y Ciencia En Deportes y Ejercicio*.
- Błach, W., Smolders, P., Rydzik, Ł., Bikos, G., Maffulli, N., Malliaropoulos, N., Jagiełło, W., Maćkała, K., & Ambroży, T. (2021). Judo injuries frequency in Europe's top-level competitions in the period 2005–2020. *Journal of Clinical Medicine*, 10(4), 1–8. <https://doi.org/10.3390/jcm10040852>
- Bonza, J. E., Fields, S. K., Yard, E. E., & Comstock, R. Dawn. (2009). Shoulder Injuries Among United States High School Athletes During the School Years. In *Journal of Athletic Training* (Vol. 44, Issue 1). www.nata.org/jat
- Bromley, S. J., Drew, M. K., Talpey, S., McIntosh, A. S., & Finch, C. F. (2018). A systematic review of prospective epidemiological research into injury and illness in Olympic combat sport. In *British Journal of Sports Medicine* (Vol. 52, Issue 1, pp. 8–16). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097313>
- Dennis Caine, Nicola Maffulli, & Carolina Caine. (2008). Epidemiología de las lesiones en el deporte infantil y adolescente: tasas de lesiones, factores de riesgo y prevención. *CLINICA DE MEDICINA DEPORTIVA*.
- Ebert, J. R., Munsie, C., & Joss, B. (2014). Guidelines for the early restoration of active knee flexion after total knee arthroplasty: Implications for rehabilitation and early intervention. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 95(6), 1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.02.015>
- Isaac, D., Falode, T., Liu, P., l'Anson, H., Dillow, K., & Gill, P. (2005). Accelerated rehabilitation after total knee replacement. *Knee*, 12(5), 346–350. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2004.11.007>
- Konnyu, K. J., Thoma, L. M., Cao, W., Aaron, R. K., Panagiotou, O. A., Bhuma, M. R., Adam, G. P., Balk, E. M., & Pinto, D. (2023). Rehabilitation for Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 102(1), 19–33. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000002008>
- Kordi, R., Ziaee, V., Rostami, M., & Wallace, W. A. (2011). Indirect catastrophic injuries in olympic styles of wrestling in Iran. In *Sports Health* (Vol. 3, Issue 1, pp. 29–31). <https://doi.org/10.1177/1941738110379104>
- Law, M., Stewart, D., Pollock, & Letts, L. (1998). Critical Review Form – Quantitative Studies (1). Universidad Mcster.
- Piussi, R., Nilsson, E., Karlsson, H., Hägglund, M., Ivarsson, A., Samuelsson, K., Holmberg, H. C., & Senorski, E. H. (2024). Wrestling with a ghost: facing an opponent I can neither see nor clinch – the experience of professional wrestlers who have suffered an ACL injury.

BMJ Open Sport and Exercise Medicine, 10(1).
<https://doi.org/10.1136/bmjsem-2023-001782>

Shadgan, B., Feldman, B. J., & Jafari, S. (2010). Wrestling Injuries During the 2008 Beijing Olympic Games. AMERICAN JOURNAL OF SPORTS MEDICINE, 38(9), 1870–1876. <https://doi.org/10.1177/0363546510369291>

Tabben, M., Augustovičová, D., Coquart, J., Alkhelaifi, K., Chamari, K., & Arriaza,

R. (2023). Karatekas educated on injury prevention and supported by fitness coaches are more likely to practise injury prevention. Biology of Sport, 40(1), 171–177. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2023.112089>

Análisis estadístico de los intentos de suicidio y factores asociados en los jóvenes de Santander, 2016-2023

Manuela Alejandra García Valbuena

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
manuela2211922@correo.uis.edu.co

Hoover Fabián Rueda Chacón, Ph. D.

Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
hfarueda@uis.edu.co

Resumen

Se propone analizar los mecanismos y factores relacionados con los intentos de suicidio en los jóvenes (18 a 28 años) de Santander, en el periodo 2016-2023. Se toma un conjunto de datos disponible en el DANE, recopilado por las unidades primarias generadoras de datos (hospitales y centros asistenciales), se realiza la limpieza de datos y un análisis exploratorio; se observa que la muestra de jóvenes registra el mayor número de casos. Se evaluaron los diferentes mecanismos y factores para determinar la relación que existía entre estos y el sexo usando la prueba de chi-cuadrado. Adicionalmente, se determinaron aquellos factores que tienen correlación significativa con otras variables. Las mujeres tienen mayor probabilidad de intentar suicidarse por factores como problemas de pareja y maltrato físico, psicológico o sexual. Por el contrario, en los hombres predominan factores como problemas económicos, legales, laborales y enfermedades crónicas. Además, la quinta semana epidemiológica del año reporta el mayor número de casos, mientras que el año con más casos reportados es el 2022. Existe una relación entre el sexo y

los factores; los problemas de consumo de sustancias psicoactivas y antecedentes de trastornos psiquiátricos son los que más afectan a los hombres y mujeres jóvenes, respectivamente.

Palabras clave: intentos de suicidio, jóvenes, factor de riesgo, factor desencadenante, mecanismos.

1. Introducción

A nivel mundial, cada año más de 700.000 personas se suicidan; el suicidio es un fenómeno que afecta a varias regiones del mundo, pero se puede prevenir de manera oportuna (Organización Mundial de la Salud, 2023). Así mismo, el intento de suicidio en la vida del individuo es un factor de riesgo para ejecutar el suicidio consumado (Organización Mundial de la Salud, 2014).

El intento de suicidio representa no solamente un impacto psicológico para el individuo y seres cercanos, en ocasiones discapacidad a largo plazo debido al impacto del intento, sino también una carga económica y social para la comunidad, dado

el uso de los servicios de salud para tratar las lesiones. Por tal motivo, es un evento de interés de la salud pública. En Colombia, los intentos de suicidio se vigilan desde el año 2016, a través del Sistema de Vigilancia en Salud (Sivigila), elemento central para su prevención. Desde entonces, los intentos han aumentado gradualmente a nivel nacional (Secretaría Distrital de Salud, 2021).

Según el reporte de la semana epidemiológica 26 del año 2023 (Gobernación de Santander, 2023), en el primer semestre del año se reportaron 874 intentos de suicidio en el departamento de Santander; Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Barrancabermeja y Piedecuesta fueron los municipios con mayor incidencia del fenómeno. El informe indica que el 60 % de los casos de intento de suicidio corresponde a mujeres. Así mismo, la literatura (Rueda-Jaimes *et al.*, 2010) ha encontrado que las mujeres referencian más casos de intento de suicidio, y utilizan métodos menos letales, más impulsivos, y suelen pedir más ayuda. Por el contrario, los hombres suelen ser quienes presentan más casos de suicidio consumado.

Como respuesta a estos casos, en Santander, se han implementado programas como “Familias Fuertes” (Ministerio de Justicia y del Derecho de Colombia, 2014) y “Habilidades para la Vida y Liderazgo”, que buscan fomentar un espacio de bienestar (Gobernación de Santander, 2023).

En este proyecto se busca analizar los datos de intentos de suicidio en Santander, brindados por Sivigila, para determinar cuáles son las poblaciones más afectadas, identificar factores de riesgo, desencadenantes y mecanismos empleados. Para el análisis, se hace uso de métodos de estadística descriptiva para determinar la frecuencia de cada una de las variables.

Además, se utilizan métodos estadísticos como la prueba de chi-cuadrado para obtener la razón de momios, junto con los intervalos de confianza determinados por el sexo y el grupo de edad. Finalmente, se calcula la matriz de correlación entre los mecanismos, factores de riesgo y desencadenantes, con el fin de determinar las posibles relaciones que existen entre ellos.

2. Metodología

Para este estudio se usaron datos disponibles en el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), que contiene los casos de intención suicida entre enero de 2016 y abril del 2023 (Datos Abiertos Colombia, 2019). Este conjunto de datos incluye los casos registrados en Santander (4173), en respuesta a una “ficha de notificación” proporcionada por el Sivigila, que hace parte del protocolo de vigilancia de los intentos de suicidio.

El conjunto de datos está compuesto por 51 columnas entre las que se encuentran los datos básicos de los individuos (edad, departamento de procedencia, tipo de seguridad social, comuna donde reside), datos del hecho (barrio donde ocurrió, falleció o no, hospitalización, hospital o centro asistencial que registró el caso), mecanismos del intento (ahorcamiento, lanzamiento al vacío, intoxicación, lanzamiento a un vehículo, arma cortopunzante), factores desencadenantes (problemas de pareja, problemas familiares, problemas económicos, problemas legales, maltrato físico, psicológico o sexual) y factores de riesgo (antecedentes de trastornos mentales, presencia de trastornos mentales, esquizofrenia, consumo de sustancias psicoactivas (SPA), abuso del alcohol, ideación suicida, planeación suicida).

Es importante notar que los factores de riesgo suicida se definen como los factores predisponentes que pueden desencadenar un acto suicida (Aristizábal Vásquez *et al.*, 2013). Por otro lado, los factores desencadenantes de suicidio, según el Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, se describen como una situación específica que desencadena un resultado o proceso particular, en este caso el intento de suicidio.

2.1 Limpieza de datos

Para garantizar una estructura clara y completa de los datos, se realiza la limpieza del conjunto de datos descargado de la página del DANE. En particular, se eliminan 7 registros en los cuales la casilla “*nmun_proce*” (municipio de procedencia) está vacía; al ser tan solo el 0,16 % del total de los datos, no son significativos para un análisis estadístico. También se elimina la columna “*tipo_susta*” (tipo de sustancia en caso de usar el método de “intoxicación”) y “*nmun_resi*” (municipio de residencia), dado que el 41 % y 100 % de los registros, respectivamente, estaban vacíos. Por tal motivo, el conjunto de datos resultante, sobre el cual se trabajó finalmente, contiene 4166 registros y 49 columnas.

2.2 Análisis exploratorio de datos

Se realiza un análisis exploratorio de los datos para determinar e identificar los aspectos y las variables más relevantes. Tras realizar esta exploración, se procede a filtrar los datos por sexo (mujeres y hombres) y rango de edad, y se generan diferentes muestras de poblaciones como la primera infancia, infancia, adolescencia, juventud, adultez y persona mayor. Este filtrado se reali-

za con el fin de identificar aquellos factores que afectan a las distintas poblaciones.

Para el análisis de los datos y generación de gráficos se usó el lenguaje de programación Python, y librerías como *Pandas*, *Seaborn*, *Matplotlib*, *Scipy* y *Numpy*. Con el objetivo de determinar la existencia de relaciones entre las variables, se calculó la matriz de correlación por medio de la función *Pandas.Obj.corr()*, y para visualizarla como un *heatmap* se usó la función *Seaborn.heatmap()*.

2.3 Análisis estadístico de datos

Se utilizaron métodos estadísticos como la prueba de chi-cuadrado para obtener la razón de momios, junto con los intervalos de confianza, con el fin de analizar los factores de riesgo o desencadenantes y mecanismos del intento suicida en términos del sexo y el grupo de edad. Para aplicar la prueba de chi-cuadrado, se usó la función *Stats.chi2_contingency()*, la cual recibe la tabla de contingencia, que contiene los casos de hombres y mujeres que presentaron o no un mecanismo, factor de riesgo o desencadenante, y retorna los valores de chi-cuadrado, valor P, grados de libertad y las frecuencias esperadas. Estos valores permiten observar la relación entre la proporción de las poblaciones y el nivel de confiabilidad de esos datos.

En este artículo nos enfocamos particularmente en la población de jóvenes (18 a 28 años), dado que ocupan el 40,8 % de los casos (1699 casos); esta es la población más recurrente, seguida de la adultez (29 a 59 años) y la adolescencia (12 a 17 años), las cuales ocupan 27,92 % y 26,64 %, respectivamente.

3. Resultados

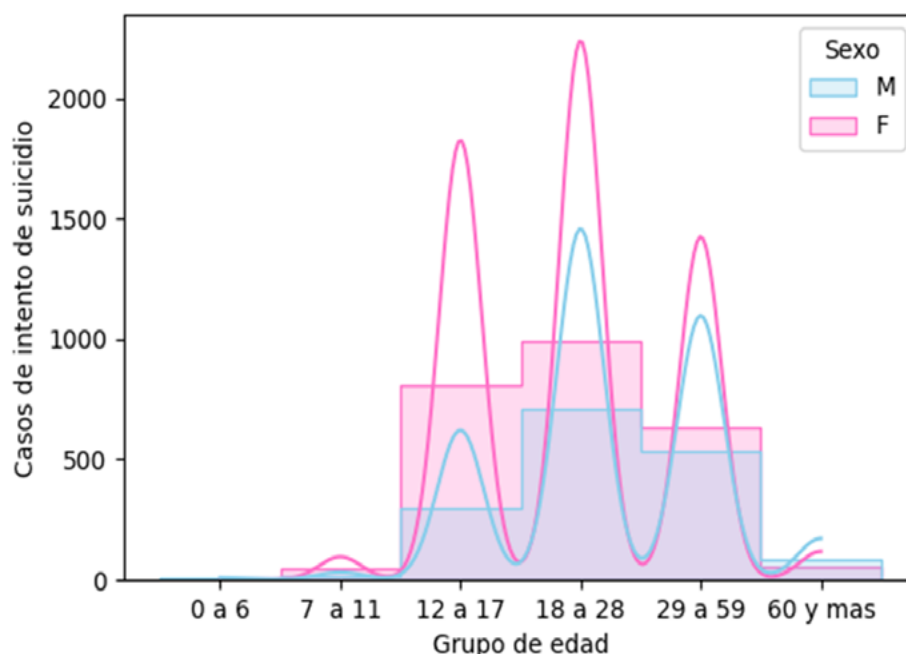
3.1 Distribución de intentos de suicidio por grupo de edad

En la figura 1 se observa que los jóvenes (18 a 28 años), en Santander, ocupan la mayoría de los casos de los intentos de suicidio, seguido de los

adultos (29 a 59 años) y los adolescentes (12 a 17 años). La figura se encuentra dividida por el sexo (masculino y femenino), donde se evidencia que las mujeres, a diferencia de los hombres, presentan una mayoría de los casos en la adolescencia comparado con la adultez. Adicionalmente, se observa que las mujeres presentan mayor recurrencia en los intentos de suicidio, exceptuando el grupo de persona mayor (60 o más años).

Figura 1

Histograma de los intentos de suicidio en términos de los diferentes grupos de edad



Fuente: elaborada por autores.

3.2 Distribución de intentos de suicidio por año

En la figura 2 se muestra el comportamiento de los intentos de suicidio desde enero del año 2016 hasta la semana epidemiológica 15 del 2023. Allí se puede observar un aumento en los casos cada año, a excepción del 2023, debido a que solo se

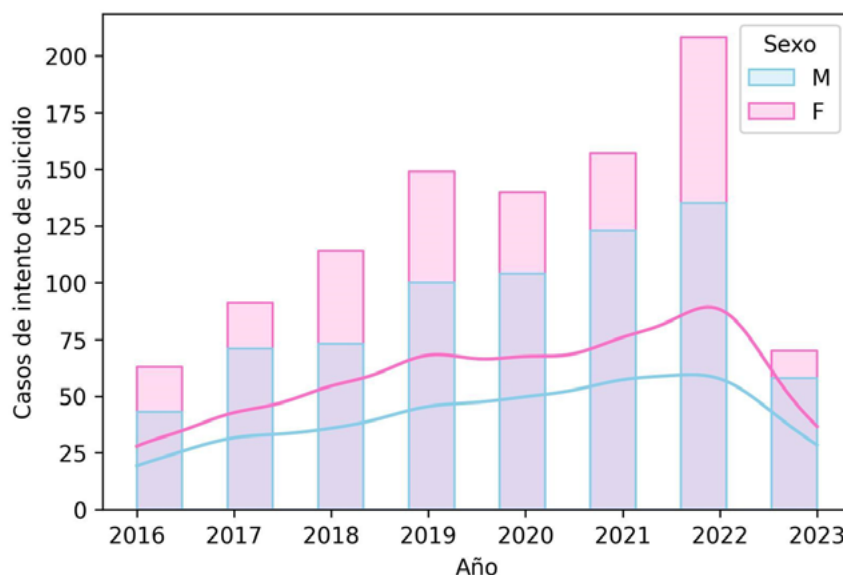
cuenta con registros hasta abril. Resulta preocupante que en lo corrido del año 2023 (primer trimestre), la cantidad de intentos de suicidio es semejante a la de todo el 2016.

Distribución de intentos de suicidio por semana epidemiológica

En la figura 3 se observa el comportamiento de los intentos de suicidio por semanas del año; en las semanas 5 y 7 se presentan más casos, en los hombres y las mujeres, respectivamente.

Figura 2

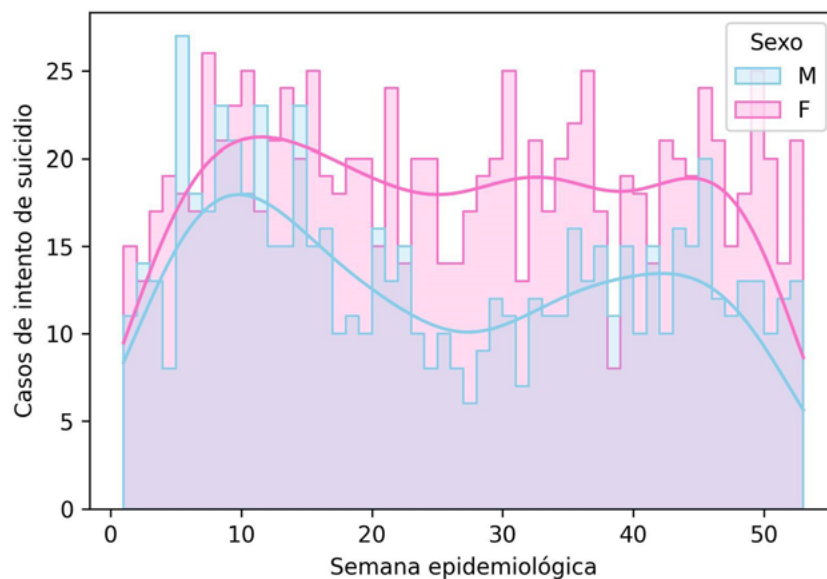
Diagrama de barras de los intentos de suicidio a lo largo de los años 2016-2023



Fuente: elaborada por autores.

Figura 3

Histograma de los intentos de suicidio según semana epidemiológica años 2016 - 2022

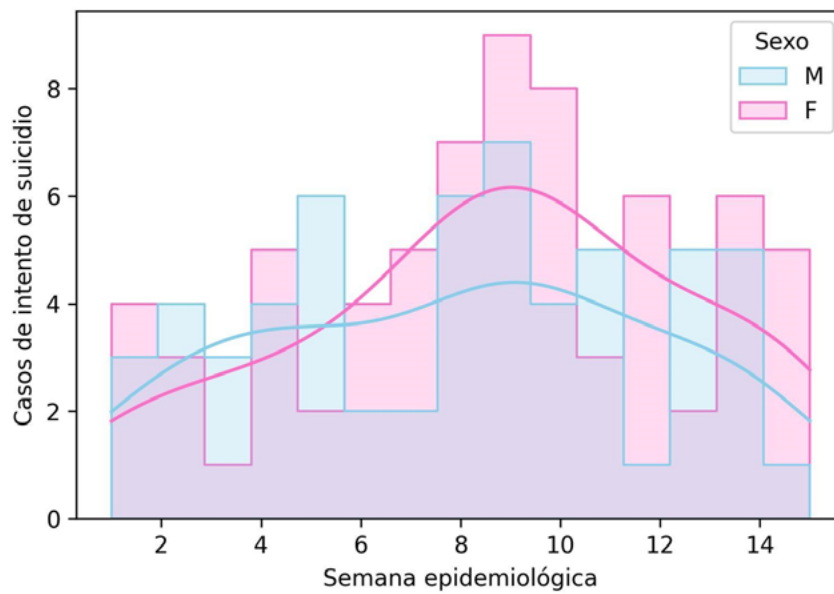


Fuente: elaborada por autores.

En la figura 4 se observa el comportamiento de los intentos de suicidio para los datos recolectados en el año 2023. Se puede visualizar que en la semana 9 se presentaron la mayoría de los casos para hombres y mujeres.

Figura 4

Histograma de los intentos de suicidio según semana epidemiológica en el año 2023



Fuente: elaborada por autores

3.4 Prueba chi-cuadrado

Para poder determinar cuál es la diferencia entre las variables mencionadas al principio (factores de riesgo, desencadenantes y el mecanismo) y su relevancia evaluando las distintas poblaciones de sexo (femenino y masculino) entre los jóvenes, se realiza la prueba de chi-cuadrado, donde se determina los niveles de significancia utilizando un valor-p menor al 5 % ($p < 0,05$). Con esta prueba se encuentra que existen 16 variables relacionadas con el sexo, es decir, la probabilidad de una persona intentar el suicidio dado un factor de riesgo o desencadenante determinado y un mecanismo va a depender de su sexo.

En la tabla 1 se presentan los mecanismos que, al aplicar la prueba de chi-cuadrado, obtienen un valor-p menor de 0,05 y una razón de momios con un intervalo de confianza del 95 %; un intervalo más estrecho indica mayor confiabilidad. Como se puede observar, la tabla utiliza los colores rosado y azul para simplificar su lectura, e indica a qué sexo pertenece la razón de momios. Por ejemplo, las mujeres tienen 2,59 veces más probabilidad de usar la intoxicación como mecanismo para el intento de suicidio. Los hombres tienen 1,68 veces más probabilidad de usar como mecanismo para el intento de suicidio el arma cortopunzante.

3.5 Matriz de correlación

En la figura 5 se aprecia la matriz de correlación entre las variables. Para esta matriz se tuvieron en cuenta las variables que pasaron el test de chi-cuadrado expuesto en la sección 3.4 (det-

lladas en la tabla I), con el fin de analizar si existen correlaciones entre estas. En consecuencia, de las 16 variables de la tabla I, se identifican y hacen parte de la matriz las variables que obtuvieron índices de correlación mayores de $|0,1|$.

Tabla 1

Prueba de chi-cuadrado, intervalos de confianza y odds ratio

Categorías	Variables		Mujeres		Hombres		P < 0.05	OR	IC 95%
			%	n	%	n			
Mecanismos	Intoxicación	Sí	71.17	706	48.80	345	0.000000	2.59	[2.12 3.17]
		No	28.83	286	51.20	362			
	Arma cortopunzante	Sí	22.08	219	32.25	228	0.000004	1.68	[1.35 2.09]
		No	77.92	773	67.75	479			
	Ahorcamiento	Sí	3.43	34	9.05	64	0.000002	2.80	[1.83 4.30]
		No	96.57	958	90.95	643			
Factores desencadenantes	Lanzamiento al vacío	Sí	4.64	46	9.90	70	0.000034	2.26	[1.54 3.32]
		No	95.36	946	90.10	637			
	Problemas de pareja	Sí	46.47	461	36.78	260	0.000083	1.49	[1.23 1.82]
		No	53.53	531	63.22	447			
	Problemas económicos	Sí	12.10	120	16.83	119	0.007010	0.68	[0.59 0.89]
		No	87.90	872	83.17	588			
	Maltrato físico, psicológico o sexual	Sí	7.06	70	4.67	33	0.053519	1.55	[1.01 2.37]
		No	92.94	922	95.33	674			
	Problemas laborales	Sí	5.65	56	8.35	59	0.037003	1.52	[1.04 2.22]
		No	94.35	936	91.65	648			
	Problemas legales	Sí	3.33	33	7.07	50	0.000630	2.21	[1.41 3.47]
		No	96.67	959	92.93	657			
Factores de riesgo	Enfermedad crónica	Sí	3.23	32	5.37	38	0.038100	1.70	[1.05 2.76]
		No	96.77	960	94.63	669			
	Antecedentes de trastornos	Sí	47.98	476	42.43	300	0.026777	1.25	[1.03 1.52]
		No	52.02	516	57.57	407			
	Trastornos mentales	Sí	43.95	436	32.81	232	0.000005	1.61	[1.31 1.96]
		No	56.05	556	67.19	475			
	Problemas de consumo	Sí	13.91	138	43.56	308	0.000000	4.78	[3.78 6.03]
		No	86.09	854	56.44	399			
	Antecedentes de violencia	Sí	6.05	60	2.69	19	0.001771	2.33	[1.38 3.94]
		No	93.95	932	97.31	688			
	Abuso de alcohol	Sí	4.23	42	10.33	73	0.000001	2.60	[1.76 3.86]
		No	95.77	950	89.67	634			
	Esquizofrenia	Sí	1.31	13	6.22	44	0.000000	5.00	[2.67 9.35]
		No	98.69	979	93.78	663			

Figura 5

Matriz de correlación entre las variables de la tabla 1 que pasaron las condiciones del test de chi-cuadrado y arrojaron un valor de correlación mayor a $|0,1|$



Fuente: elaborada por autores.

4. Discusión

Los resultados arrojan que en el año 2022 se registraron 343 intentos de suicidio; este fue el año con mayor número de casos. Se resalta que el año 2016 tuvo 106 casos en total, sin contemplar posibles variables exógenas, mientras que el año 2023, a la altura de su semana epidemiológica 15, ya reportaba 128 casos. Ahora bien, se evidencia que la semana epidemiológica de mayor frecuencia de casos es la semana 5, con 45 casos en total, seguida de las semanas 8, 9 y 45, con 44 casos en total. Por otra parte, en los jóvenes, se identificó que algunos métodos y factores están relacionados con el sexo. Por ejemplo, las mujeres tienen más probabilidades de usar como mecanismo la intoxicación, mientras que los hombres tienen más probabilidades de usar el ahorcamiento, lanzamiento al vacío y el arma cortopunzante. Esto concuerda con lo reportado por (Aristizábal Vásquez *et al.*, 2013), acerca de que las mujeres usan métodos menos letales, y los hombres presentan más casos en el suicidio consumado, dado la letalidad que tiene el mecanismo utilizado.

Así mismo, las mujeres tienen mayor probabilidad de intentar suicidarse por factores como problemas de pareja y maltrato físico, psicológico o sexual. Este último, tiene un índice de correlación de 0,40 con los antecedentes de violencia (predominante en las mujeres). Por el contrario, en los hombres se evidencia predominancia en factores como problemas económicos, legales, laborales y enfermedades crónicas.

Por otra parte, se resaltan los factores de riesgo, donde se señala que los hombres tienen 4,78 veces más probabilidad de intentar suicidarse por problemas de consumo de SPA. Esto concuerda con Cañón Buitrago y Carmona Parra (2013) que menciona que el consumo de SPA, como la ingesta prolongada de la cocaína, distorsiona el

funcionamiento normal del individuo, y la asocian con el trastorno depresivo mayor, límite obsesivo-compulsivo o antisocial, donde según la patología psiquiátrica se asocian directamente con el suicidio. Adicionalmente, los problemas de consumo de SPA se correlacionan con el mecanismo de arma cortopunzante, con un índice de 0,24. También, tienen 5 veces más probabilidad que las mujeres de intentar suicidarse por la condición de esquizofrenia, seguido del abuso del alcohol, con 2,6 veces. A diferencia de los hombres, en las mujeres predominan los antecedentes de violencia, los antecedentes de trastornos mentales y los trastornos mentales, donde estos dos últimos guardan un índice de correlación de 0,80.

5. Conclusiones

Los intentos de suicidio son un problema complejo debido a su multifactorialidad, contexto, situaciones personales, entre otros aspectos. Como conclusiones del estudio realizado encontramos que febrero, abril y noviembre son los meses donde más se presentan casos en la población santandereana, que vienen en aumento desde el 2016.

Se resalta que los problemas de pareja son el mayor factor desencadenante para hombres y mujeres jóvenes. Particularmente en los hombres, los problemas de consumo de SPA son el mayor factor de riesgo, lo cual concuerda con lo expuesto por Cañón Buitrago y Carmona Parra (2013) acerca de que el consumo de sustancias psicoactivas se relaciona con trastornos que pueden llevar a los intentos de suicidio en los hombres. En las mujeres jóvenes son los antecedentes de trastornos psiquiátricos.

Respecto al mecanismo utilizado, las mujeres jóvenes recurren más a la intoxicación, mientras que los hombres usan el ahorcamiento, lanzamiento al

vacío y el arma cortopunzante con más frecuencia. Lo anterior concuerda con la afirmación de Rueda-Jaimes *et al.* (2010), quienes señalan que, si bien las mujeres se intentan suicidar más que los hombres, estos últimos cometen el suicidio consumado dada la letalidad del mecanismo.

Finalmente, se resalta un punto de encuentro entre lo propuesto por Aristizábal Vásquez *et al.* (2013), quienes concluyen que las mujeres se ven más afectadas por el abuso sexual; en Santander, el maltrato físico, psicológico o sexual son los motivos que afectan más a las mujeres.

Como estrategias de prevención, se recomienda abordar desde las instituciones las consecuencias y problemáticas que implican el abuso del consumo de alcohol y sustancias psicoactivas, la violencia y los trastornos mentales.

Referencias

- Aristizábal Vásquez, C., Cañón Buitrago, S. C., Castaño Castrillón, J. J., *et al.* (2013). Riesgo suicida y factores asociados en instituciones de rehabilitación para adictos a las drogas en Manizales, 2012. *Archivos de Medicina (Col)*, 13(1), 11-23.
- Cañón Buitrago, S. C., & Carmona Parra, J. A. (2018). Ideación y conductas suicidas en adolescentes y jóvenes. *Rev Pediatr Aten Primaria*, 20, 387-95.
- Datos Abiertos Colombia. (2019). *86-Intención suicida SIVIGILA enero 2016 a abril 2019*. Recuperado de <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/86-Intencion-suicida-sivigila-enero-2016-a-abril-2/78wv-f29q>
- Gobernación de Santander. (2023). *Boletín epidemiológico de Santander*. Recuperado de <https://santander.gov.co/publicaciones/9549/problemas-familiares-el-factor-mas-desencadenante-en-intento-de-suicidio-en-santander/>
- Ministerio de Justicia y del Derecho de Colombia. (2014). *Familias fuertes: Amor y límites*. Recuperado de https://www.minjusticia.gov.co/programas-co/ODC/Publicaciones/Publicaciones/CO1052014_familias_fuertes_amor_limites_plegable.pdf
- National Cancer Institute. (n.d.). *Desencadenante*. Diccionario de cáncer. Recuperado de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/desencadenante>
- Organización Mundial de la Salud. (2014). *Prevención del suicidio: Un imperativo global*. Recuperado de https://www.who.int/mental_health/suicide-prevention/world_report_2014/es/
- Organización Mundial de la Salud. (2023). *Preguntas y respuestas sobre el suicidio*. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/suicide>
- Pinuaga, P., & Stengel, E. (1967). Psicología del suicidio y los intentos suicidas. *Revista Española de La Opinión Pública*, 7, 449-462. <https://doi.org/10.2307/40180921>
- Rueda-Jaimes, G. E., Rangel Martínez-Villalba, A. M., Castro-Rueda, V. A., & Camacho, P. A. (2010). Suicidabilidad en adolescentes: Una comparación con población adulta. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 39(4), 671-685.
- Secretaría Distrital de Salud. (2021). *Protocolo VSP - Intento de suicidio*. Recuperado de <https://www.saludcapital.gov.co/CTDLab/Publicaciones/2021/Protocolo%20VSP-Intento%20de%20suicidio.pdf>

Transformar el mundo es posible... ¡a la manera de los niños!

Karen Camila Barbosa Bonilla

Licenciatura en Educación Básica Primaria, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
karen2201423@correo.uis.edu.co

César Augusto Roa

Licenciatura en Educación Básica Primaria, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
caroa@uis.edu.co

Nicolle Sofía Aparicio Álvarez

Licenciatura en Matemáticas, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
nicole2202859@correo.uis.edu.co

Resumen

La realización del I Congreso Infantil Paidópolis: *Mentes brillantes y Paidotalentos en Acción*, en el marco de la celebración del Paidofest 2024, 20 años Paidópolis, buscaba generar un espacio de encuentro y compartir de experiencias educativas a nivel regional, nacional e internacional, que potencien el uso creativo de la mediación tecnológica y/o artística en los procesos de aprendizaje y formación integral de las diferentes áreas de la educación básica primaria y sexto grado, y el reconocimiento de los diversos talentos y habilidades artísticas y culturales de niños(as), maestros y padres de familia. Con relación a lo anterior, la participación atenta, creativa y gozosa de 1000 niños, junto con sus maestros y algunos acudientes, fue la característica del ambiente que se vivió el pasado 30 de agosto en el auditorio Luis A. Calvo de la UIS, como resultado de un proceso de planeación e investigación-acción de varios meses de preparación y 20 años de legado pedagógico a la manera de *Paidópolis, el País y la Ciudad de los Niños*.

Palabras clave: Paidópolis, formación integral, niños, transformar, competencias y habilidades.

1. Introducción

La propuesta comunicativa Paidópolis, el País y la Ciudad de los Niños, en su vigésimo aniversario, conmemora tal acontecimiento con el Paidofest 2024, 20 años Paidópolis. Comprende la realización de 3 grandes eventos: *I Congreso Infantil: Mentes Brillantes y Paidotalentos en Acción; Emprendópolis, Mentes Creativas y Empoderadas; y Paidotalentos* (obra musical y presentaciones artísticas).

El semillero Seipa, en conjunto con los equipos Paidópolis, PACA —Paidópolis, Comunidades de Aprendizaje— y maestros de las instituciones educativas partícipes del programa, realizaron el *I Congreso Infantil Paidópolis: Mentes brillantes y Paidotalentos en acción*, que surgió de la necesidad de generar y fomentar espacios de memoria, de encuentro, de interacción, aprendizaje, celebración y reconocimiento a los niños(as), maes-



tros, familias, instituciones de educación básica primaria, instituciones públicas y privadas y redes de apoyo, con motivo de las dos décadas de la primera emisión del programa radial Paidópolis.

El documento *Transformar el mundo es posible... ¡la manera de los niños!* recoge parte del sentir, pensar y la convicción de quienes participamos tanto de la planeación, participación y organización del evento, como de quienes con el corazón y razón henchidos de emoción veían con esperanza a los niños que realizaban su ponencia o presentación artística de manera individual o en equipo con otros niños, maestros o padres de familia frente a un auditorio de cerca de mil personas, entre los asistentes de mañana y tarde. Es posible, desde edad temprana, potenciar el desarrollo gradual e integral de las capacidades que connaturalmente poseen los niños por el solo hecho de ser seres humanos.

El desarrollo de capacidades en los niños, que se manifiestan en competencias y habilidades cognitivas, científicas, comunicativas, sociocidadanas, ambientales, artísticas y estéticas, entre otras, es posible por el potencial que tiene la propuesta educocomunicativa Paidópolis de fomentarlas, en padres de familia y maestros como corresponsables de la educación de los niños y del fomento de competencias pedagógico-didácticas.

2. Metodología

El enfoque de investigación implementado en los procesos Paidópolis, según lo descrito, es fundamentalmente cualitativo, se basa en un diseño de investigación-acción y acción participativa. Este enfoque combina teoría y práctica al implicar una interacción activa entre los investigadores y los participantes, en este caso, los niños (Estupiñán *et al.*, 2013). Esta metodología busca mediar e

identificar los intereses y necesidades de los niños al ponerlos en el centro del proceso. De igual manera, el papel de los adultos en Paidópolis es significativo, pues, está orientado hacia el apoyo de los procesos a la manera creativa, curiosa, alegre, dinámica, descomplicada y persistente que caracteriza a los niños como científicos por naturaleza como pequeños y grandes ciudadanos; artistas y apasionados defensores de la vida, de la inclusión y cuidado del medioambiente. El programa radial Paidópolis favorece que los niños(as) desarrollen capacidades

Figura 1
Capacidades desarrolladas en Paidópolis



El proceso de investigación-acción implicó cuatro fases: la primera, de exploración e indagación para identificar necesidades y posibles temáticas orientadoras del congreso; la segunda, planeación y organización en coordinación con los maestros, padres de familia, estudiantes y semilleristas con quienes se definieron las líneas temáticas del congreso, se acordaron requerimientos generales para la inscripción, presentación de las ponencias y presentaciones artísticas, y la escritura de formatos como el de charlas TEDx; se elaboró un video didáctico, plantilla de presentación orientadora en formato Canva o Power Point para que los participantes pudieran utilizar la que más se ajustara a sus preferencias; y, por último, en esta fase, se establecieron los requisitos y criterios de selección y presentación, la búsqueda de pa-

trocinadores y de estrategias de divulgación y promoción del evento.

La tercera fase fue la implementación o realización del *I Congreso Infantil: Mentes brillantes y Paidotalentos en Acción*, llevado a cabo el 30 de agosto de 2024. Allí, los participantes, niños(as), padres de familia y maestros ponentes y/o paidotalentos, se encontraron en el Auditorio Luis A. Calvo de la Universidad Industrial de Santander, en la jornada de la mañana y de la tarde, para presentar a estudiantes, padres de familia, maestros y a miembros de la comunidad educativa universitaria sus ponencias talentos y habilidades acordes con las líneas temáticas del congreso infantil: científico-matemática, comunicativa, folclórica, socialciudadana y las TIC aplicadas a la educación.

En el evento se contó con la participación de invitados especiales como destacados científicos investigadores, entre ellos: Elena Stashenko, Julián Rodríguez, Sandra Evely Parada; niños activistas como Francisco Vera; niños emprendedores como Samuel Grajales, María José Uribe, Simón Cifuentes (el niño orquesta), y adultos emprendedores y creadores de la escuela de líderes, como Leonardo Sánchez; además de los distintos niños ponentes y paidotalentos seleccionados previamente (<https://acortar.link/CBuUlv>).

Para garantizar el desarrollo del evento y el bienestar de los niños(as), se tuvieron en cuenta consideraciones éticas como el principio de beneficencia y de no maleficencia, así como contar con el consentimiento informado de los padres para asistir al Paidofest. Asimismo, por medio de las instituciones educativas, los estudiantes adquirieron pólizas de seguros para poder desplazarse hacia la Universidad Industrial de Santander.

La cuarta fase fue la evaluación y proyección de resultados. Se encuentra en desarrollo, e implica

evaluación general del proceso y de los eventos del Paidofest, con participación de los equipos organizadores de maestros de las instituciones educativas participantes, el equipo Paidópolis, el semillero Seipa y el equipo del proyecto PACA. En esta fase se pretende buscar el reconocimiento y valoración de los logros, la identificación de aspectos por mejorar para futuros eventos, periodicidad del emprendópolis, del congreso infantil, organización de memorias, entrega de certificados y la planeación y organización de la obra musical en el marco de la Fiesta de las Luces, organizada anualmente por la UIS.

3. Resultados

Luego de haber llevado a cabo tres de las fases de investigación-acción, se evidenció el desarrollo de habilidades esenciales en los niños(as), tanto participantes como ponentes y paidotalentos; los niños demostraron un destacado manejo del escenario y un dominio notable en sus habilidades comunicativas y de oratoria, que les permitió comunicar sus ideas de manera clara, alegre y efectiva ante el público. Análogamente, el enfoque educomunicativo del programa radial Paidópolis impulsó su capacidad para utilizar herramientas digitales y recursos pedagógicos de manera creativa, con la facilidad de una comunicación más dinámica y accesible para el público, que era en su mayoría niños(as) de educación básica primaria.

Durante la preparación como ponentes o paidotalentos, se fortalecieron otras competencias de liderazgo, como la organización del discurso, la argumentación y el pensamiento crítico, esenciales para estructurar sus ideas. Desarrollaron confianza en sí mismos, trabajo en equipo y la gestión del tiempo, lo cual les permitió coordinarse y ajustarse a los tiempos establecidos para sus presentaciones. Estas experiencias no solo



potenciaron su expresión oral, también su liderazgo, autogestión y habilidades sociales y técnicas fundamentales en su proceso de formación integral.

A continuación, se presentará por medio de material audiovisual la compilación de los momentos vivenciados durante el I Congreso Infantil: *Mentes brillantes y Paidotalentos en Acción*.

Figura 2

Material audiovisual del I Congreso Infantil Paidópolis Mentes brillantes y Paidotalentos en Acción



Tomado de: https://www.instagram.com/reel/C_YND-CWxnNb/?utm_source=ig_web_copy_link&igsh=MzRlODBiNWFlZA==

4. Discusión

El I Congreso Infantil Paidópolis *Mentes brillantes y Paidotalentos en Acción* introduce un enfoque innovador en Colombia, al organizar quizás el primer congreso infantil protagonizado y creado por niños(as). Este modelo de congreso rompe con la tradición de eventos académicos, donde los adultos suelen dirigir las actividades y limitar la participación infantil o ser en su totalidad con un público de edades adultas.

Comparado con iniciativas internacionales que promueven la participación de niños(as) en ciencia, divulgación y expresión artística, como en los congresos infantiles en Europa o Norteamérica. Este estudio va un paso más allá al otorgar a los niños(as) un papel central en la creación y presentación de material científico y artístico. Esto marca una diferencia significativa respecto a otros contextos, donde la participación infantil suele estar mediada o guiada por adultos, tal como en The Kid's Conference (2019), realizada en Inglaterra, que abarca una serie de eventos que promueven la socialización de proyectos de investigación realizados por estudiantes de primaria y secundaria, cuya participación en las conferencias fortalece el rol investigativo y reflexivo de estudiantes y maestros, quienes reconstruyen sus roles para promover una educación que fortalezca el liderazgo y la transformación.

5. Conclusiones

Se generó un espacio de disfrute, encuentro y compartir de experiencias educomunicativas entre los estudiantes, padres de familia y maestros, que impactó de manera significativa a los asistentes, participantes, familias, instituciones educativas de educación básica primaria, instituciones educativas públicas y privadas y redes de apoyo, pues no solo se desarrollaron competencias blandas como la empatía, el liderazgo, la gestión emocional y habilidades integrales que contribuyen a su vida académica, sino que estas también se convierten en habilidades para la vida.

Se transforman los entornos educativos y fomentan nuevas formas de interacción entre estudiantes, maestros y comunidades. Esta transformación impactará en los participantes, en sus familias, en las instituciones y comunidades educativas y sociales; evidencia la esperanza de que

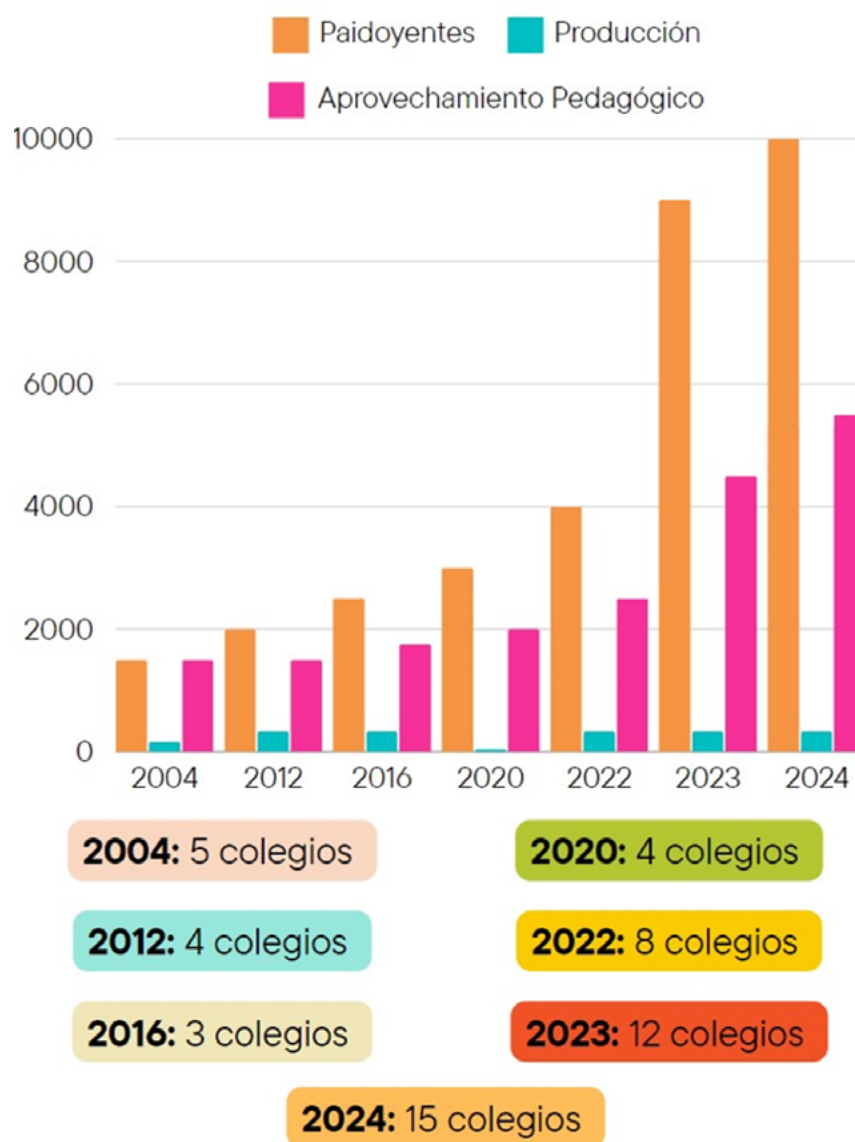
las presentes y futuras generaciones se preparan para enfrentar los retos de un mundo globalizado, interconectado y en constante evolución.

¿Qué dicen las cifras? A continuación, se presenta la relación de *paidoyentes* y colegios que se

han ido sumando a lo largo de los años con la intención de participar en los procesos de pre- y producción o de escuchar y/o aprovechar pedagógicamente los programas radiales Paidópolis, su red de medios y proyectos de investigación que suscita.

Figura 3

Gráfica de barras, relación paidoyentes y colegios participantes



“Si buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo” (Albert Einstein).

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas, organizaciones e instituciones que hicieron posible la organización y el desarrollo del Congreso Infantil Paidópolis. A los Semilleristas Seipa: Daniela Villamizar Villamizar, Lorenth Geraldine Manrique Caicedo, Silvia Alejandra García Vega, Andrea Gynella Rivera Aguirre, Ivonne Alejandra Caicedo, Mariana Torres González, Santiago Díaz Galeano, Camila Valentina Gamboa, Félix Andrés Luna Chavarría, Carlos Guerrero Cuy, María Angélica Guerrero Vega; al equipo de Paidópolis y PACA-Paidópolis; a los paidovoluntarios por su invaluable apoyo logístico; a las instituciones educativas públicas y privadas; a los maestros(as) pertenecientes a las instituciones educativas Paidópolis, quienes con su entusiasmo, dedicación y compromiso fueron parte fundamental en cada etapa del proceso organizativo del I Congreso Infantil: *Mentes brillantes y Paidotalentos en Acción*, en el Paidofest, celebración 20 años Paidópolis.

Extendemos nuestro más sincero agradecimiento y reconocimiento a la Alcaldía de Bucaramanga, en el marco de la Feria Bonita de Colombia, a las secretarías de Educación y de Desarrollo Social por su respaldo institucional, y al INDERBÚ; a la Alcaldía de Betulia, Santander, por fomentar espacios que promueven la cultura y la educación en sus habitantes. De igual manera, agradece-

mos profundamente a la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la Rectoría, la Vicerrectoría Académica, la Dirección de Comunicaciones, la Escuela de Educación, la Escuela de Artes, al Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED), a la Facultad de Ciencias Humanas, a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, a la división de Planta Física y a la Asociación de profesores UIS (AS-PROUIS), por su apoyo valioso y oportuno, sin el cual el congreso infantil no habría sido posible. Gracias a todos por su compromiso con la educación del país y la ciudad de los niños.

¡Juntos lo hicimos posible!

Referencias

Estupiñán, M.R, Puentes, A.I, Mahecha, M y Rey, C.A. (2013). Investigación Cualitativa: Métodos comprensivos y participativos de investigación. Editorial UPTC.

Kid's Conference. (2019). The Kid's Conference Story. Kid 's Conference. Recuperado de: <https://kidsconference.online/>

Innovación en nutrición de precisión para un futuro cercano

Alberto Ángel-Martín

Escuela de Nutrición y Dietética, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
angelmar@uis.edu.co

Nicole Dayane Herrán-Guerrero

Escuela de Nutrición y Dietética, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
ndherran@hotmail.com

Natalia Rocío Moreno-Castellanos

Facultad de Salud, Universidad Industrial de Santander, Colombia,
nrmorcas@uis.edu.co

Resumen

La nutrición de precisión ha emergido como un enfoque innovador que busca personalizar las recomendaciones dietéticas basadas en las características individuales de cada persona, incluidas su genética, microbiota, estilo de vida y condiciones de salud. Esta revisión sistemática examina las últimas innovaciones en el campo de la nutrición de precisión, donde destacan tecnologías emergentes como la genómica, la metabolómica, el uso de inteligencia artificial para el análisis de datos nutricionales y el desarrollo de alimentos funcionales. Se analizan estudios recientes (últimos 10 años) de las principales bases de datos (PubMed, Google Scholar, Elsevier, Scopus y Web of Science), que demuestran cómo estas herramientas pueden optimizar la salud y prevenir enfermedades crónicas a través de intervenciones dietéticas personalizadas. Se incluyeron 21 artículos donde se discuten los desafíos y oportunidades

que enfrenta la implementación de la nutrición de precisión en la práctica clínica y en la salud pública. Los hallazgos sugieren que, a medida que la investigación avanza, la nutrición de precisión tiene el potencial de transformar la forma en que abordamos la alimentación y la salud, y ofrece un futuro más saludable y sostenible. Esta revisión proporciona una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el ámbito de la nutrición personalizada.

Palabras clave: nutrición de precisión, nutrigenómica, inteligencia artificial en nutrición, alimentos funcionales.

1. Introducción

En los últimos años, la nutrición de precisión ha surgido como un enfoque revolucionario en el ámbito de la salud y el bienestar. A diferencia

de las recomendaciones dietéticas tradicionales, que a menudo son generales y no consideran las particularidades de cada individuo, la nutrición de precisión se centra en personalizar las pautas alimentarias según las características únicas de cada persona. Esto incluye factores como la genética, la microbiota intestinal, el estilo de vida y las condiciones de salud específicas (De Toro-Martín et al., 2017).

El avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de herramientas innovadoras, como la genómica y la metabolómica, que facilitan un análisis más profundo de cómo los alimentos afectan a cada individuo. Además, la inteligencia artificial se ha convertido en un aliado clave en el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos nutricionales, lo que abre nuevas posibilidades para intervenciones dietéticas más efectivas (Zatsu et al., 2024).

Este enfoque no solo busca optimizar la salud individual, sino también prevenir enfermedades crónicas, lo que representa un cambio significativo en la forma en que entendemos la relación entre la alimentación y la salud. Sin embargo, la implementación de la nutrición de precisión enfrenta desafíos en la práctica clínica y en la salud pública, lo que plantea la necesidad de seguir investigando y desarrollando estrategias que faciliten su adopción.

Además, es necesario explorar las últimas innovaciones en el campo de la nutrición de precisión, para identificar las oportunidades que presenta para transformar nuestra aproximación a la alimentación y la salud, y sentar las bases para futuras investigaciones en este prometedor ámbito.

2. Metodología

Se realizó una revisión sistemática exploratoria exhaustiva en las principales bases de datos científicas: PubMed, Google Scholar, Elsevier, Scopus y Web of Science. La búsqueda se centró en estudios publicados en los últimos diez años (2013-2023) que abordaran las innovaciones en el campo de la nutrición de precisión. Se utilizaron términos de búsqueda como “nutrición de precisión”, “nutrigenómica”, “inteligencia artificial en nutrición” y “alimentos funcionales”.

Los estudios incluidos en la revisión debían cumplir los siguientes criterios:

- Publicaciones en revistas científicas revisadas por pares.
- Investigaciones que exploren herramientas y tecnologías emergentes en nutrición personalizada.
- Estudios que examinen la aplicación de la nutrición de precisión en la prevención de enfermedades crónicas y la optimización de la salud.
- Artículos que discutan desafíos y oportunidades en la implementación de este enfoque en la práctica clínica y la salud pública.

El proceso de selección se llevó a cabo en varias etapas. En primer lugar, se identificaron y recolectaron los artículos mediante la búsqueda en las bases de datos mencionadas. Posteriormente, se realizó una revisión de los títulos y resúmenes para eliminar estudios irrelevantes. Finalmente, se examinó el texto completo de los artículos seleccionados para evaluar su pertinencia y calidad metodológica.

Se llevó a cabo un análisis cualitativo de los 21 estudios seleccionados, con un enfoque en las tecnologías emergentes, los resultados de las intervenciones dietéticas personalizadas y las implicaciones para la salud pública.

Además, se discutieron las barreras y facilitadores identificados en la implementación de la nutrición de precisión en diferentes contextos. Se aseguró que todos los estudios incluidos en esta revisión cumplan con los estándares éticos requeridos en investigaciones que involucran a seres humanos y la privacidad de los datos.

3. Resultados

La revisión sistemática identificó un total de 32 estudios relevantes que cumplían con los criterios de inclusión. A continuación, se presentan los hallazgos clave organizados en función de las tecnologías emergentes, intervenciones dietéticas y desafíos identificados.

3.1 Tecnologías emergentes

Nutrigenómica: se encontró que el análisis genético permite personalizar las recomendaciones dietéticas, adaptando la ingesta de macronutrientes y micronutrientes a perfiles genéticos individuales. Diversos estudios señalaron que las variantes genéticas pueden influir en la respuesta a diferentes dietas, lo que abre oportunidades para intervenciones más efectivas (Kiani *et al.*, 2022). La nutrigenómica ha sido fundamental para comprender cómo los metabolitos en el cuerpo responden a diferentes alimentos y dietas. Se identificaron biomarcadores específicos que podrían usarse para predecir la respuesta metabólica a ciertas intervenciones dietéticas (Brennan y De Roos, 2020).

3.2 Inteligencia artificial en nutrición (IA)

La aplicación de algoritmos de IA para analizar grandes volúmenes de datos nutricionales ha mostrado un potencial significativo en la identificación de patrones de salud y comportamiento alimentario. Los estudios resaltan la capacidad de la IA para personalizar recomendaciones dietéticas, integrando información compleja que incluye genética, microbiota y hábitos de vida. Esta tecnología puede mejorar la precisión y la efectividad de las intervenciones dietéticas (Armand *et al.*, 2024).

3.3 Desarrollo de alimentos funcionales

La investigación también ha dado lugar al desarrollo de alimentos funcionales, que son productos diseñados para proporcionar beneficios adicionales para la salud, más allá de la nutrición básica. Estos alimentos funcionales pueden ser utilizados en intervenciones específicas para modificar la microbiota intestinal y mejorar la salud digestiva (Jendyose, 2024). Los estudios han mostrado que la incorporación de estos alimentos funcionales puede potenciar los efectos de las intervenciones dietéticas personalizadas, lo cual contribuye a un enfoque más integral en la salud del individuo (Banerjee *et al.*, 2023).

3.4 Intervenciones dietéticas personalizadas

Los estudios revisados mostraron que las intervenciones dietéticas basadas en enfoques de nutrición de precisión lograron mejorar la salud metabólica y reducir el riesgo de enfermedades crónicas. Por ejemplo, se reportaron mejoras

significativas en marcadores de salud como la glucosa en sangre y los perfiles lipídicos en participantes que siguieron dietas personalizadas (Antwi, 2023).

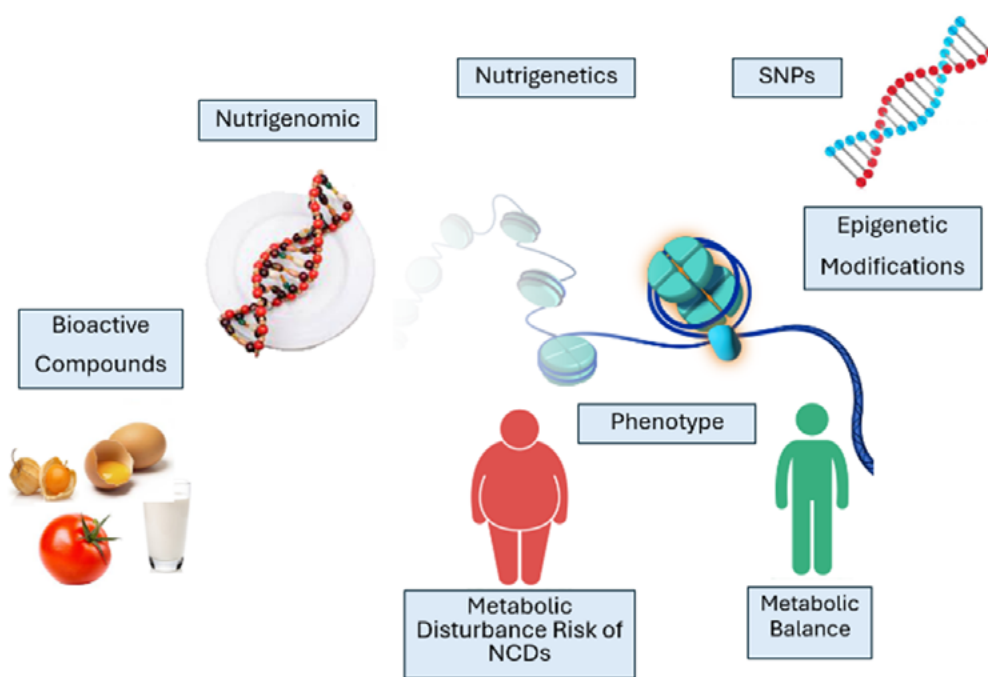
4. Discusión

La nutrición de precisión se está consolidando como un enfoque innovador y prometedor en la personalización de recomendaciones dietéticas.

Esta revisión sistemática ha puesto de manifiesto las tecnologías emergentes, como la nutrigenómica y la inteligencia artificial, que están impulsando este campo hacia nuevas fronteras (Singh *et al.*, 2024). Los hallazgos sugieren que, al integrar información genética, metabólica y comportamental, es posible desarrollar intervenciones dietéticas más efectivas y adaptadas a las necesidades individuales de cada persona (Celis-Morales *et al.*, 2016).

Figura 1

Interacciones entre genes, dieta y salud



Implicaciones de la nutrigenómica

La nutrigenómica ha demostrado su capacidad para revelar cómo las variaciones genéticas afectan la respuesta a diferentes nutrientes y dietas. Esto abre la puerta a un enfoque más individualizado en la alimentación, donde las recomendaciones pueden adaptarse a perfiles genéticos específicos (Meiliana y Wijaya, 2020). Sin embargo, la aplicación práctica de esta tecnología en la clínica aún enfrenta desafíos, por ejemplo, la necesidad de validar biomarcadores y establecer protocolos estandarizados que garanticen la efectividad de las intervenciones (Mathers, 2016).

Rol de la inteligencia artificial

El uso de inteligencia artificial en el análisis de datos nutricionales es otro avance significativo. La IA tiene el potencial de procesar grandes volúmenes de datos y detectar patrones que serían difíciles de identificar de manera manual (Alowais *et al.*, 2023). Esto no solo mejora la precisión de las recomendaciones dietéticas, sino que también permite una monitorización más continua de la salud. Aun así, se requiere una mayor investigación para optimizar los algoritmos y asegurar que sean accesibles y aplicables en diversos contextos clínicos (Ali *et al.*, 2023).

Desarrollo de alimentos funcionales

El desarrollo de alimentos funcionales también representa una vía valiosa para implementar la nutrición de precisión. Estos productos no solo enriquecen la dieta con nutrientes esenciales, sino que también ofrecen beneficios adicionales para la salud (Shahnaz *et al.*, 2024). Sin embargo, es crucial que la investigación continúe en esta área para evaluar la eficacia de estos alimentos y garantizar que sean aceptables y accesibles para la población general (Baker *et al.*, 2022).

Desafíos y oportunidades futuras

A pesar de los avances, la implementación de la nutrición de precisión enfrenta varios desafíos. La falta de estandarización en la recolección de datos, la formación insuficiente de los profesionales de la salud y las preocupaciones éticas sobre la privacidad de los datos genéticos son aspectos que requieren atención. No obstante, la creciente colaboración entre investigadores, nutricionistas y tecnólogos puede allanar el ca-

mino hacia soluciones efectivas (Basulo-Ribeiro y Teixeira, 2024).

5. Conclusiones

La nutrición de precisión representa un enfoque revolucionario en el campo de la alimentación y la salud, con el potencial de transformar la forma en que abordamos la dieta y el bienestar. Esta revisión sistemática ha destacado varias innovaciones clave, como la nutrigenómica, la inteligencia artificial y el desarrollo de alimentos funcionales, que están facilitando la personalización de las recomendaciones dietéticas (Hinojosa-Nogueira *et al.*, 2024).

Los hallazgos sugieren que, al considerar factores individuales como la genética, el metabolismo y el estilo de vida, es posible diseñar intervenciones dietéticas más efectivas que no solo mejoren la salud metabólica, sino que también ayuden a prevenir enfermedades crónicas. (Franzago *et al.*, 2020). La integración de tecnologías emergentes permite optimizar estas intervenciones, y ofrece un enfoque más holístico y adaptado a las necesidades de cada persona (Clemente-Suárez *et al.*, 2023).

Sin embargo, la implementación de la nutrición de precisión no está exenta de desafíos. La falta de estandarización, las necesidades de formación para los profesionales de la salud y las preocupaciones éticas en torno a la privacidad de los datos son aspectos que deben ser abordados. A pesar de estos obstáculos, las oportunidades para avanzar en este campo son vastas y prometedoras (Mennella *et al.*, 2024).

Para finalizar, la nutrición de precisión tiene el potencial de revolucionar la salud pública y la práctica clínica. Es esencial fomentar una mayor in-

vestigación y colaboración interdisciplinaria para desarrollar aplicaciones prácticas que beneficien a la población en su conjunto. A medida que el campo continúa evolucionando, es probable que se produzcan avances significativos que mejoren nuestra comprensión de la interacción entre la dieta y la salud individual (Lee *et al.*, 2022)

Referencias

- De Toro-Martín, J., Arsenault, B., Després, J., & Vohl, M. (2017). Precision Nutrition: A review of personalized nutritional approaches for the prevention and management of metabolic syndrome. *Nutrients*, 9(8), 913. <https://doi.org/10.3390/nu9080913>
- Zatsu, V., Shine, A. E., Tharakan, J. M., Peter, D., Ranganathan, T. V., Alotaibi, S. S., Mugabi, R., Muhsinah, A. B., Waseem, M., & Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence—a review. *Food Chemistry X*, 101867. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101867>
- Kiani, A. K., Bonetti, G., Donato, K., Kaftalli, J., Herbst, K. L., Stuppia, L., Fioretti, F., Nodari, S., Perrone, M., Chiurazzi, P., Bellinato, F., Gisondi, P., & Bertelli, M. (2022). Polymorphisms, diet and nutrigenomics. *PubMed*, 63(2 Suppl 3), E125–E141. <https://doi.org/10.15167/2421-4248/jpmh2022.63.2s3.2754>
- Brennan, L., & De Roos, B. (2020). Nutrigenomics: lessons learned and future perspectives. *American Journal of Clinical Nutrition*, 113(3), 503–516. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqaa366>
- Armand, T. P. T., Nfor, K. A., Kim, J., & Kim, H. (2024). Applications of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Nutrition: A Systematic review. *Nutrients*, 16(7), 1073. <https://doi.org/10.3390/nu16071073>
- Jendyose, M. (2024). Development of Functional Foods with Enhanced Health Benefits. *Journal of Food Sciences*, 5(2), 29–42. <https://doi.org/10.47941/jfs.1846>
- Banerjee, A., Somasundaram, I., Das, D., Manoj, S. J., Banu, H., Suresh, P. M., Paul, S., Bisgin, A., Zhang, H., Sun, X., Duttaroy, A. K., & Pathak, S. (2023). Functional Foods: a promising strategy for restoring gut microbiota diversity impacted by SARS-COV-2 variants. *Nutrients*, 15(11), 2631. <https://doi.org/10.3390/nu15112631>
- Antwi, J. (2023). Precision nutrition to improve risk factors of obesity and type 2 diabetes. *Current Nutrition Reports*, 12(4), 679–694. <https://doi.org/10.1007/s13668-023-00491-y>
- Singh, V. K., Hu, X., Singh, A. K., Solanki, M. K., Vijayaraghavan, P., Srivastav, R., Joshi, N. K., Kumari, M., Singh, S. K., Wang, Z., & Kumar, A. (2024). Precision nutrition-based strategy for management of human diseases and healthy aging: current progress and challenges forward. *Frontiers in Nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1427608>
- Celis-Morales, C., Livingstone, K. M., Marsaux, C. F. M., Macready, A. L., Fallaize, R., O'Donovan, C. B., Woolhead, C., Forster, H., Walsh, M. C., Navas-Carretero, S., San-Cristobal, R., Tsirigoti, L., Lambrinou, C. P., Mavrogianni, C., Moschonis, G., Kolossa, S., Hallmann, J., Godlewski, M., Surwitto, A., Mathers, J. C. (2016). Effect of personalized nutrition on health-related behaviour change: evidence from the Food4me European randomized controlled

- trial. *International Journal of Epidemiology*, dyw186. <https://doi.org/10.1093/ije/dyw186>
- Meiliana, A., & Wijaya, A. (2020). Nutrigenetics, Nutrigenomics and Precision nutrition. *The Indonesian Biomedical Journal*, 12(3), 189–200. <https://doi.org/10.18585/inabj.v12i3.1158>
- Mathers, J. C. (2016). Nutrigenomics in the modern era. *Proceedings of the Nutrition Society*, 76(3), 265–275. <https://doi.org/10.1017/s002966511600080>
- Ali, O., Abdelbaki, W., Shrestha, A., Elbasi, E., Alryalat, M. a. A., & Dwivedi, Y. K. (2023). A systematic literature review of artificial intelligence in the healthcare sector: Benefits, challenges, methodologies, and functionalities. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(1), 100333. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100333>
- Shahnaz, T., Fawole, A. O., Adeyanju, A. A., & Onuh, J. O. (2024). Food proteins as functional ingredients in the management of Chronic Diseases: A Concise review. *Nutrients*, 16(14), 2323. <https://doi.org/10.3390/nu16142323>
- Baker, M. T., Lu, P., Parrella, J. A., & Leggette, H. R. (2022). Consumer Acceptance toward Functional Foods: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1217.
- Baker, M. T., Lu, P., Parrella, J. A., & Leggette, H. R. (2022). Consumer Acceptance toward Functional Foods: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1217. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031217><https://doi.org/10.3390/ijerph19031217>
- (Basulo-Ribeiro, J., & Teixeira, L. (2024). The Future of Healthcare with Industry 5.0: Preliminary Interview-Based Qualitative Analysis. *Future Internet*, 16(3), 68. <https://doi.org/10.3390/fi16030068>
- Hinojosa-Nogueira, D., Subiri-Verdugo, A., Díaz-Perdigones, C. M., Rodríguez-Muñoz, A., Vilches-Pérez, A., Mela, V., Tinahones, F. J., & Moreno-Indias, I. (2024). Precision or Personalized Nutrition: A bibliometric analysis. *Nutrients*, 16(17), 2922. <https://doi.org/10.3390/nu16172922>
- Franzago, M., Santurbano, D., Vitacolonna, E., & Stuppia, L. (2020). Genes and diet in the prevention of chronic diseases in future generations. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7), 2633. <https://doi.org/10.3390/ijms21072633>
- Mennella, C., Maniscalco, U., De Pietro, G., & Esposito, M. (2024). Ethical and regulatory challenges of AI technologies in healthcare: A narrative review. *Heliyon*, 10(4), e26297. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26297>
- Lee, B. Y., Ordovás, J. M., Parks, E. J., Anderson, C. A., Barabási, A., Clinton, S. K., De La Haye, K., Duffy, V. B., Franks, P. W., Ginexi, E. M., Hammond, K. J., Hanlon, E. C., Hittle, M., Ho, E., Horn, A. L., Isaacson, R. S., Mabry, P. L., Malone, S., Martin, C. K., Martinez, M. F. (2022). Research gaps and opportunities in precision nutrition: an NIH workshop report. *American Journal of Clinical Nutrition*, 116(6), 1877–1900. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac237>

El entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución y su efecto en el salto vertical y sprint en atletas universitarios: una revisión sistemática

Juan Sebastián de Villar Nieto

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander, Colombia
juan2248269@correo.uis.edu.co

Juan José Landinez Cruz

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander, Colombia
jjlandin@correo.uis.edu.co

Judith Flórez Gómez

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander, Colombia judi-
th2248274@correo.uis.edu.co

Lianell Jova Elejalde

Maestría en Desarrollo del Talento Deportivo, Universidad Industrial de Santander, Colombia
elejalde@correo.uis.edu.co

Resumen

El entrenamiento de la fuerza es fundamental para mejorar el desempeño de los atletas de rendimiento. En la actualidad, son variados los métodos para el mejoramiento de esta capacidad física, entre los que se destaca, por la casi recuperación completa entre sesiones y la resolución del problema de la diaria variabilidad de la fuerza máxima, el entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución, en inglés, *velocity-based-resistance-training* (VBRT). El estudio estuvo orientado a analizar los resultados científicos sobre el VBRT y su efecto en el rendimiento de las pruebas de salto vertical y en carreras cortas de velocidad en atletas universitarios. Se realizó una revisión sistemática, a partir

de la metodología PRISMA, de los resultados de investigaciones sobre el efecto de los entrenamientos VBRT en el rendimiento de las pruebas 1RM, el salto vertical CMJ y la velocidad en la carrera de 10 y 20 metros en deportistas universitarios. Las bases de datos consultadas fueron Scopus, Web of Sciences, Pubmed y ProQuest, de las cuales se incluyeron 8 artículos que fueron analizados; se concluyó que los valores obtenidos en las pruebas iniciales de las variables evaluadas incrementaron significativamente después de la intervención con el VBRT.

Palabras clave: entrenamiento de la fuerza, velocidad de ejecución, salto vertical, sprint, atletas universitarios.

1. Introducción

El entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución (VBRT) es un paradigma que se basa en la relación carga-velocidad para predecir la repetición máxima (IRM) en el entrenamiento de resistencia; muestra ventajas para controlar la intensidad del ejercicio, conocer la relación entre la velocidad de ejecución y la carga (González-Badillo y Sánchez-Medina, 2010). También definida como “métodos que utilizan la velocidad para informar o mejorar la práctica del entrenamiento”, utiliza índices de velocidad captados por monitores para evaluar debidamente el rendimiento del entrenamiento y regular dinámicamente las cargas de entrenamiento. La velocidad media de propulsión y la pérdida de velocidad son dos índices estándar para regular la carga de entrenamiento. La velocidad media de propulsión se emplea para seleccionar el peso de entrenamiento, mientras que la pérdida de velocidad se utiliza para determinar las repeticiones de entrenamiento durante una serie (Weakley *et al.*, 2020). Gracias a este paradigma, los deportistas disponen de un contenido de entrenamiento personalizado que se ajusta a su preparación diaria.

En el deporte universitario son varios los países que han acogido el uso de este paradigma para mejorar el rendimiento en la fuerza máxima, expresadas en las acciones propias de los deportes como son salto, desplazamientos, lanzamientos, golpes (Bae y Ok, 2019).

Teniendo en cuenta el elevado número de resultados reportados sobre el entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución y su relación con variables de rendimiento en diversos deportes, se presenta la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué resultados científicos actuales se han obtenido referente al entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución y su efecto en el rendimiento de las pruebas de salto vertical y carreras cortas de velocidad en atletas universitarios?

El objetivo de este estudio es analizar los resultados científicos sobre el entrenamiento de la fuerza basado en el control de la velocidad de ejecución y su efecto en el rendimiento de las pruebas de salto vertical y en las carreras cortas de velocidad en atletas universitarios.

2. Metodología

Esta revisión sistemática fue desarrollada de acuerdo con los parámetros establecidos en los Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Haddaway *et al.*, 2022). Para la búsqueda y selección de documentos se establecieron diferentes criterios tales como: que fuesen ensayos, publicados a partir del año 2019, escritos en inglés o español, que se puedan encontrar con acceso abierto sin necesidad de pago, que evaluaran el entrenamiento de la resistencia basado en la velocidad con un grupo experimental, que informaran los efectos sobre las variables de salto en el salto en contra movimiento, sentadilla con salto y pruebas de velocidad de carrera.

Búsqueda, selección e inclusión de la información

Para la ecuación de búsqueda nos centramos en conceptos clave para facilitar la indagación; el resultado fue el siguiente: “velocity based resistance training” AND “college”. Dicha combinación fue aplicada en las bases de datos de PubMed,

Web of Science, Scopus y ProQuest, y dio como resultado 63 artículos; 4 fueron descartados por duplicado. Los 48 artículos se filtraron manualmente en base al título de los artículos. Posteriormente, se filtraron las publicaciones restantes en una matriz Excel, donde se estructuró el título del artículo, resumen, objetivo y conclusiones.

Para la recolección de los datos, los autores se encargaron de extraer la siguiente información para el correspondiente análisis: referencias y año de la publicación; diseño; población de estudio, número de participantes, sexo, edad; cada cuánto se realizó la intervención; métodos de evaluación; si los resultados fueron reportados de forma estadística; si personas de la muestra abandonaron la investigación.

Valoración de la calidad metodológica de los estudios seleccionados

A partir del formulario de evaluación crítica de Law *et al.* (1998), se evaluó la calidad metodológica de los estudios. Se tuvieron en cuenta 14 aspectos de evaluación: 1) propósito del estudio, 2) relevancia de la literatura, 3) diseño del estudio, 4) muestra incluida (descripción), 5) muestra incluida (tamaño), 6) fiabilidad de los resultados, 7) validez de los resultados, 8) procedimiento de intervención, 9) resultados 10) importancia clínica, 11) abandonos, 12) implicaciones prácticas, 13) conclusión, 14) limitaciones. De cada artículo se identificó su cumplimiento o no de aspectos asociados a la calidad metodológica para finalmente determinar la relevancia.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA

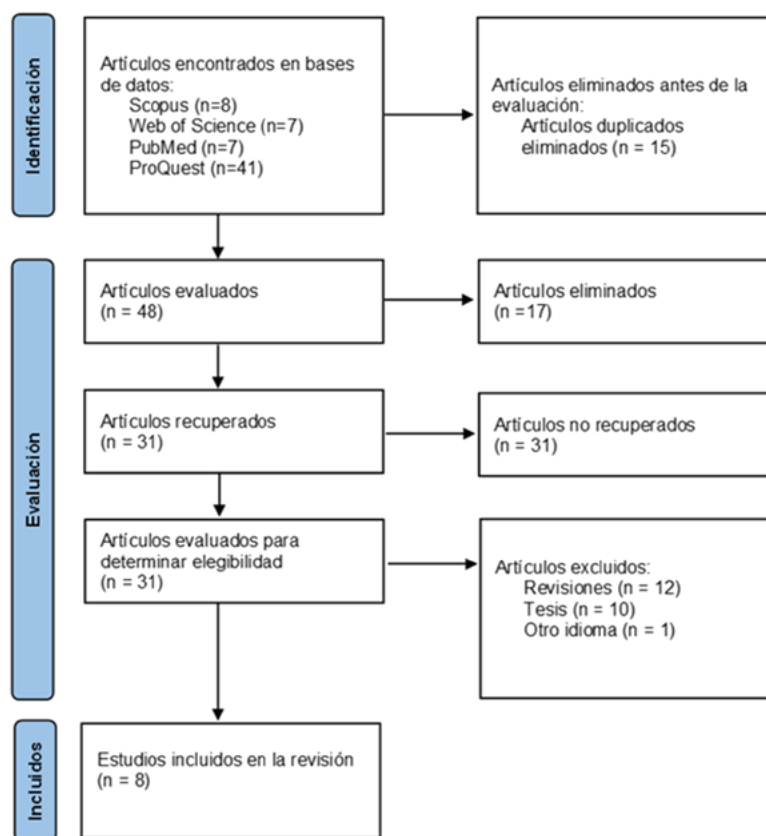


Tabla 1

Principales variables y resultados obtenidos en los artículos seleccionados

Referencia	n (M/F)	edad Estatura Peso	Tipo de entrenamiento					
			Grupos	Frecuencia (veces/semana)	Intensidad/Volumen	Duración (semanas)	Dispositivo	Variable analizada y % de cambio
Zhang, Mingyang	(0/18)	22.3 ± 1.8 169.7 ± 7 60.4 ± 5.8	VBRT (10) PBRT (8)	2	La velocidad objetivo en cada sesión del grupo VBRT fue equivalente a la carga relativa en el grupo PBRT. Si la VCM era 0.06 o 0.12 m/s por encima o por debajo de la velocidad objetivo, el peso del siguiente set se ajustaba en un 5% o 10% del 1RM	6	Wingate Anaerobic Test (WAnT) on a mechanically braked cycle ergometer (Monark® 894E, Varberg, Sweden) CMJ Smartjump wireless test mat (SmartJump; FusionSport, Coopers Plains, Queensland, Australia) Smartspeed fusion sport (2 smart scans and pro, Australia)	PP [W] VB: baseline 572.7 ± 43.9 post 607.4 ± 54.0 PB: baseline 592.1 ± 87.4 post 615.3 ± 76.5 MP [W] VB: baseline 432.8 ± 48.3 post 436.3 ± 51.4 PB: baseline 427.8 ± 63.1 post 451.8 ± 56.5 30-m sprint (s) VB: baseline 4.78 ± 0.2 post 4.71 ± 0.2 PB: baseline 4.8 ± 0.1 post 4.71 ± 0.2 RP-CMJ (W/kg) VB: baseline 45.7 ± 5.2 post 48.7 ± 5.3
Rissanen, J	(24/25)	26.4 ± 3.9 181.1 ± 5.4 81.9 ± 11.3 / 25.5 ± 3.8 166.6 ± 7.2 60.7 ± 6.1	(VL20M, n=12) (VL40M, n=12) (VL20W, n=13) (VL40W, n=12)	2	La intensidad del entrenamiento se determinó utilizando la estimación de 1-RM basada en la velocidad. La carga de la barra se ajustaba, si era necesario, después de la primera repetición del primer set en cada sesión de entrenamiento para coincidir con la velocidad (±0.03 m/s) que corresponde a la carga deseada (% del 1-RM estimado).	8	The MPV of each repetition in every training session was measured with a linear velocity transducer (T-Force Measurement System, Ergotech, Murcia, Spain)	programa de entrenamiento (F = 16,3–118,5, P < 0,001), con la excepción del grosor del tríceps braquial. Sin embargo, los únicos efectos significativos entre grupos de los análisis ANCOVA se observaron en la altura del CMJ para el tiempo × sexo (F = 5,2, P = 0,028) y el CSA del vasto lateral para el tiempo × sexo × pérdida de velocidad (F = 5,89, P = 0,020). También hubo tendencias en la presión arterial de baja velocidad (MPV) para el tiempo × sexo (F = 2,62, P = 0,082), el tiempo × pérdida de velocidad (F = 3,12, P = 0,053) y el tiempo × sexo × pérdida de velocidad (F = 2,54, P = 0,088), y CMJ EMG para el tiempo × sexo × pérdida de velocidad (F = 3,46, P = 0,070), 7
Abuajwa, Bassam	(22/0)	19.86 ± 0.83 171.36 ± 4.58 67.68 ± 11.21	Group 1 (low-movement velocity) 0.75–0.96 m/s Group 2 (high-movement velocity) 1.03–1.20 m/s		Si el promedio de la primera serie era > 0,06 m/s superior o inferior a la velocidad objetivo, la carga se ajustaba en ±5% 1RM para la segunda serie. De esta manera, los participantes completaron el entrenamiento de acuerdo con su objetivo de velocidad durante la sesión.	5	The bench press procedure started with the participant lying supine on the bench of the Smith Machine (Body-Solid 7 Linear Bearing Smith Machine; Body-Solid, Kuala Lumpur, Malaysia) The Beast sensor (Beast Technologies S.r.l., Brescia, Italy) wearable wireless accelerometer is comprised of a three-axis accelerometer, three gyroscopes, and a three-axis magnetometer with an acquisition frequency of 50 Hz	Low Movement Velocity Muscle Mass 30.9 ± 4.37 kg 31.86 ± 4.07 kg 3.12% %1RM 57.27 ± 14.33 kg 67.71 ± 14.42 kg 15.48% Ball Throwing velocity 14.77 ± 2.11 m.s-1 18.41 ± 3.45 m.s-1 18.70% High Movement Velocity Muscle Mass 31.12 ± 4.87 kg 32.37 ± 5.76 kg 3.54% %1RM 56.59 ± 15.58 kg 67.5 ± 21.30 kg 15.02% Ball Throwing velocity 14.21 ± 2.78 m.s-1 17.55 ± 3.18 m.s-1 18.32%
Dos Santos	(13/0)	29.62 ± 6.34 175.74 ± 6.96 87.86 ± 15.47		3	La intensidad inicial se basó en la prueba individual de potencia propulsiva media máxima utilizando un acelerómetro (Push 1.0, PUSH Pro System, PUSH Inc., Toronto, Canada) en cada ejercicio (salto en sentadilla, press de banca la zado y remo inclinado). Todos los sujetos realizaron una fase de movimiento concéntrico durante la prueba dentro de un rango de velocidad de 0.8 a 1.1 m/s ² , y la mejor carga de entre tres intentos se utilizó para la aplicación de la carga inicial.	16	The jump height was measured by the contact platform (Elite Jump®, S2Sports, São Paulo, Brazil) The sprint velocity was calculated posteriorly using Kinovea® software, all images were captured with a nIphone 7 (iOS system, 1334/750 pixels, 60Hz). The agility test was filmed by an evaluator at both moments and later analyzed in Kinovea® software	grupo de velocidad de ejecución del 0.75-0.96 mejoraron un 15.48% en su fuerza máxima, su velocidad de lanzamiento mejoró un 18.70% y su musculatura mejoró un 3.12% ----- el grupo de velocidad de ejecución del 1.03 al 1.20 mejoraron un 15.02% en su fuerza máxima / 18.32 en su velocidad de lanzamiento y musculatura un 3.54%
Zijng Huang	(14/16)	29.8 ± 1.3 173.3 ± 8.7 61.3 ± 10.2	VBRT n = 15 APRE n = 15	3	70 1RM 80 1RM 90 1RM 80 1RM 70% 1RM 0.49-0.72 m/s 80% 1RM 0.4-0.6 m/s 90% 1RM 0.32-0.48 m/s 80% 1RM 0.4-0.6 m/s	8		Squat 1RM kg APRE 87.67 ± 28.40 116.00 ± 33.12 28.33 VBRT 96.00 ± 30.31 125.33 ± 34.73 27.33
Zijng Huang	(19/0)	21.4 ± 1.4 years 170.1 ± 7.3 cm 65.9 ± 12 kg	APRE (n = 9) VBRT (n = 9)	2	APRE protocol for GRM 10× 50% 6× 75% Maximum GRM Maximum Adjusted weight Repetitions for set 3 GRM routine adjustment Set 4 adjustment 0-2-2.5 to 5 kg 3-4-0 to 2.5 kg 5-7 keep 8-12 ± 2.5 to 5 kg 13+ ± 5 to 10 k VBRT velocidad concéntrica media (MCV) al 80% del 1RM. Se ajustó la pérdida de velocidad en el 10%	4	SmartJump wireless portable jump test mat	CMJ (cm) APRE: pre 41.56 ± 7.84 post 43.57 ± 7.86 VBRT: pre 39.59 ± 7.97 post 39.81 ± 7.06 SJ (cm) APRE: pre 40.83 ± 7.69 post 40.61 ± 8.37 VBRT: pre 36.1 ± 7.35 post 36.2 ± 6.33 EUR APRE: pre 1.04 ± 0.06 post 1.06 ± 0.04 VBRT: pre 1.09 ± 0.07 post 1.09 ± 0.05 RSI APRE: pre 1.04 ± 0.27 post 1.04 ± 0.36 VBRT: pre 0.75 ± 0.21 post 0.85 ± 0.26

3. Resultados

La indagación del 14 de septiembre de 2024 arrojó 63 artículos, distribuidos en 7 documentos de Scopus, 8 de la Web of Sciences, 7 de Pubmed y 41 de ProQuest; 15 estaban duplicados, por lo que quedaron 48 artículos. Tras la revisión del título y del resumen, subsistieron 8 artículos, 5 no fueron encontrados, y quedaron 4 artículos para evaluarse por su calidad metodológica. Finalmente se incluyeron 4 estudios en la revisión (gráfico 1).

4. Discusión

Pérdida de velocidad de ejecución en la serie

El entrenamiento basado en la velocidad (VBRT) se fundamenta en detener la serie de trabajo cuando se alcanza un porcentaje específico de pérdida de velocidad en la ejecución. En los estudios revisados, se ha observado que mantener la pérdida de velocidad en un umbral del 10 % produce los mejores resultados en términos de fuerza y potencia (Rissanen, 2022; Dos Santos, 2023; Zhang, 2023). Sin embargo, algunos estudios también han explorado otros umbrales, como el 15 %, que muestra incrementos notables, aunque con una mayor fatiga acumulada (Zhang, 2023; Huang, 2024).

Pruebas de salto vertical (CMJ, SJ, DJ)

Los efectos del VBRT sobre el rendimiento en el salto vertical han sido consistentes en los estudios. Un total de 121 deportistas participaron

en estas pruebas, que incluyeron el Counter-movement Jump (CMJ), el Squat Jump (SJ) y el Drop Jump (DJ) (Rissanen, 2022; Zhang, 2023). En particular, se observaron mejoras del 8 % en la altura del CMJ y del 7 % en el DJ cuando se aplicó un umbral del 10 % de pérdida de velocidad (Zhang, 2023; Rissanen, 2022). Estas mejoras destacan la eficacia del VBRT para desarrollar la potencia explosiva de los atletas.

Pruebas de agilidad y cambio de dirección (COD, hexagon agility test)

El VBRT también demostró ser eficaz para mejorar la agilidad y la capacidad de cambio de dirección. En total, 85 deportistas participaron en estos estudios, y mostraron mejoras del 13 % en la prueba *hexagon agility* y del 6 % en la prueba 505 COD (Dos Santos, 2023; Huang, 2023). Estas mejoras se deben a una mejor coordinación neuromuscular y control de la velocidad de movimiento.

Prueba de resistencia específica (17-drill)

La prueba de “17-drill” se utilizó para medir la resistencia específica, con resultados variados entre los estudios. En la investigación de Abujawa (2022), en donde se intervino por 5 semanas con un VBRT a deportistas universitarios de balonmano, la mejora fue insignificante, con un -0,23 %, mientras que en el estudio desarrollado por Zhang (2021) se observó una mejora de -1,42 % en la prueba de 17-drill. Estos resultados sugieren que el VBRT puede tener efectos variables en la resistencia específica, dependiendo de las condiciones del entrenamiento y de la población estudiada.

Mejora en la fuerza máxima

En cuanto a la fuerza máxima, medida a través del 1RM en sentadilla y *press* de banca, se observaron mejoras significativas. En la investigación de Abuajwa (2022), los participantes lograron un incremento promedio de 15,48 % en su 1RM. Estos resultados son consistentes con la capacidad del VBRT para ajustar las cargas de entrenamiento en tiempo real, optimizando el estímulo de fuerza sin inducir una fatiga excesiva.

Mejora en la composición corporal

Finalmente, en términos de composición corporal, los estudios revisados indican mejoras modestas en la masa magra y una reducción en la masa grasa. En particular, el estudio donde se compararon los efectos del VBRT de 6 semanas (2 sesiones/semana) y del entrenamiento de resistencia basado en el porcentaje (PBRT) sobre el rendimiento atlético en jugadoras universitarias de baloncesto reportó una mejora en la relación masa magra/masa grasa tras el periodo de entrenamiento con VBRT (Zhang, 2023). Estos resultados subrayan el potencial del VBRT no solo para mejorar el rendimiento físico, sino también para optimizar la composición corporal en atletas.

Pruebas de *sprint*

En 2023, Zhang llevó a cabo dos estudios distintos que exploraron los efectos del VBRT en el rendimiento de atletas femeninas. En el primer estudio, se evaluó a 10 mujeres mediante una prueba de *sprint* de 30 metros, donde se observó una mejora de 0,07 segundos en los tiempos tras un periodo de entrenamiento de 6 semanas con VBRT. En el segundo estudio, que involucró a 8

participantes de un equipo femenino de baloncesto, se realizó una intervención similar de 6 semanas, pero en este caso, se registró una desmejora en los tiempos de *sprint*, con un aumento de 0,05 segundos en la prueba de 10 metros y 0,02 segundos en la de 20 metros. Por otro lado, Dos Santos (2023) llevó a cabo una intervención de 16 semanas con 13 jugadores de rugby, donde no se observaron cambios significativos en las pruebas de velocidad de 10 metros después del periodo de intervención con VBRT.

5. Conclusiones

La metodología VBRT mejora el rendimiento relacionado con la fuerza en los deportistas universitarios, expresada a través de la velocidad de ejecución. Permite dosificar las cargas de manera más ajustada a la realidad del atleta, si se tiene en cuenta que el sistema tradicional donde se planifica a partir de los porcentajes del 1RM basa su dosificación en una variable que se va desactualizando mientras avanzan las sesiones de entrenamiento.

La planificación u orientación de la preparación de fuerza en el deporte universitario, basada en los porcentajes de pérdida de la velocidad, como alternativa, presenta beneficios tales como trabajar con el RM real en cada repetición y entrenamientos efectivos con menor fatiga inducida en los entrenados. La prueba de salto vertical y *sprint* en los estudios analizados mejoraron de manera significativa después de intervenciones de VBRT de 5 a 8 semanas de duración, no obstante, no sucedió lo mismo para el caso de la prueba de *sprint* de 10 y 40 metros en estudios con mayor duración de la intervención.

Referencias

- Abuajwa, B., Hamlin, M., Hafiz, E., & Razman, R. (2022). The effect of high and low velocity-based training on the throwing performance of collegiate handball players. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.14049>
- Dos Santos, M. L., Nunes, R. F. H., Bezerra, E. D. S., & Bezerra, E. D. S. (2023). Effects of self-selected load-training intensity on resistance training within the season of amateur rugby athletes. *Journal of Physical Education and Sport*, 23(2), 301-309. <https://doi.org/10.7752/jpes.2023.02036>
- González-Badillo, J. J., & Sánchez-Medina, L. (2010). Movement Velocity as a Measure of Loading Intensity in Resistance Training. *International Journal of Sports Medicine*, 31(05), 347-352. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1248333>
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2). <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>
- Huang, Z., Dai, J., Chen, L., Yang, L., Gong, M., Li, D., & Sun, J. (2024). Effects of Progressive and Velocity-Based Autoregulatory Resistance Training on Lower-Limb Movement Ability in Taekwondo Athletes. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*. <https://doi.org/10.1177/19417381241262024>
- Huang, Z., Ji, H., Chen, L., Zhang, M., He, J., Zhang, W., Chen, X., Sun, J., Song, J., & Li, D. (2023). Comparing autoregulatory progressive resistance exercise and velocity-based resistance training on jump performance in college badminton athletes. *PeerJ*, 11, e15877. <https://doi.org/10.7717/peerj.15877>
- Rissanen, J., Walker, S., Pareja-Blanco, F., & Häkkinen, K. (2022). Velocity-based resistance training: do women need greater velocity loss to maximize adaptations? *European Journal of Applied Physiology*, 122(5), 1269-1280. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-04925-3>
- Zhang, M., Li, D., He, J., Liang, X., Li, D., Song, W., Ding, S., Shu, J., Sun, X., & Sun, J. (2023). Effects of Velocity-Based versus Percentage-Based Resistance Training on Explosive Neuromuscular Adaptations and Anaerobic Power in Sport-College Female Basketball Players. *Healthcare*, 11(4), 623. <https://doi.org/10.3390/healthcare11040623>
- Zhang, M., Liang, X., Huang, W., Ding, S., Li, G., Zhang, W., Li, C., Zhou, Y., Sun, J., & Li, D. (2023). The effects of velocity-based versus percentage-based resistance training on athletic performances in sport-collegiate female basketball players. *Frontiers In Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.992655>