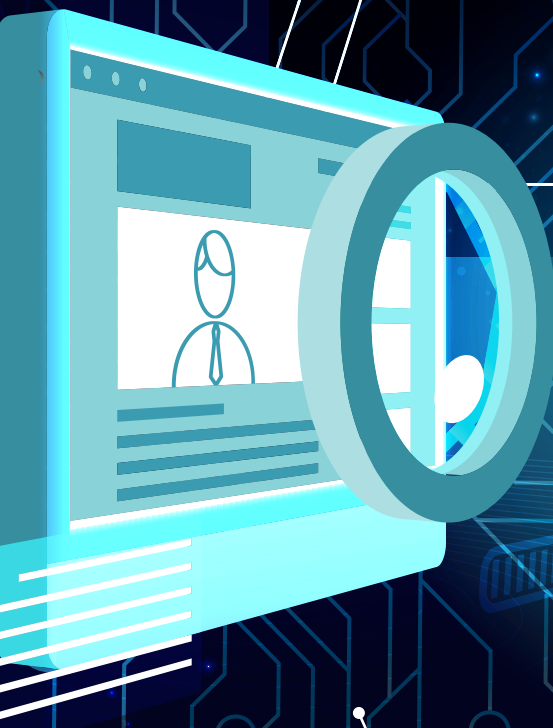


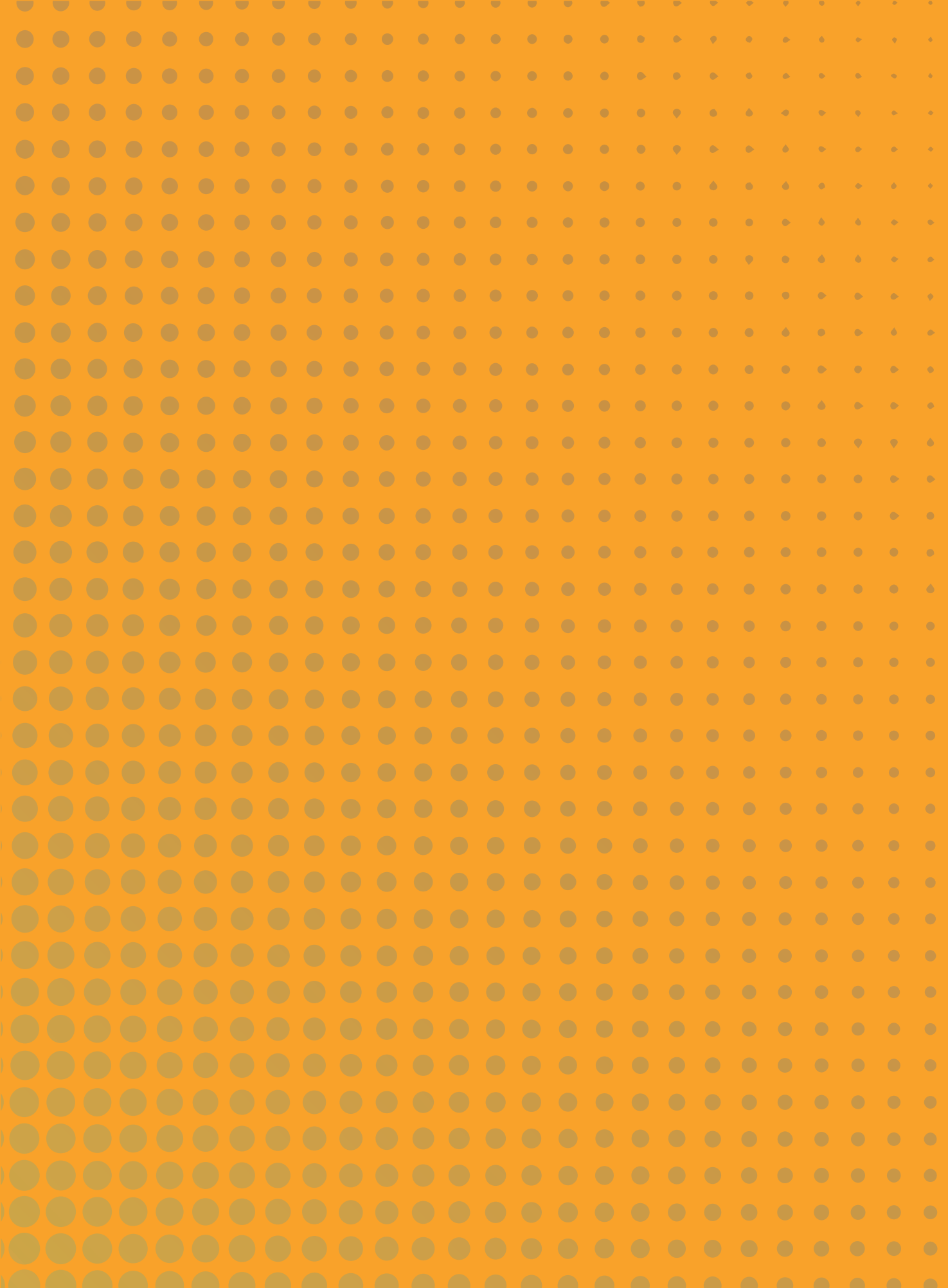


Institución
Universitaria
Reacreditada en Alta Calidad



AVANCES Y APLICACIONES DE INVESTIGACIÓN EN CALIDAD Y METROLOGÍA

Edilson Delgado-Trejos
Cristian Giovanni Gómez-Marín
Compiladores



Avances y aplicaciones de investigación en calidad y metrología

Avances y aplicaciones de investigación en calidad y metrología

Edilson Delgado-Trejos
Cristian Giovanni Gómez-Marín
(Compiladores)



Institución
Universitaria
Reacreditada en Alta Calidad

Delgado-Trejos, Edilson, autor-compilador | Gómez Marín, Cristian Giovanni, compilador.

Avances y aplicaciones de investigación en calidad y metrología / Edilson Delgado-Trejos, Cristian Giovanni Gómez-Marín (autores-compiladores). Medellín : Institución Universitaria ITM, Editorial ITM 2026. | Primera edición.

354 páginas ; 19,5 x 26,5 cm. | Ilustraciones.

1. Economía | 2. Finanzas | 3. Empresa y gestión | 4. Gestión de calidad | 5. Control de calidad

CDD 658.562 Control de calidad.

Primera edición: enero de 2026

Edilson Delgado-Trejos, Cristian Giovanni Gómez-Marín

© Institución Universitaria ITM

Sello Editorial ITM

Calle 75 75-101

Medellín, Colombia

Teléfono: 604 440 51 00 ext. 5197

<http://catalogo.itm.edu.co>

editorialitm@itm.edu.co

ISBN digital:

978-628-7751-41-5

DOI:

<https://doi.org/10.22430/9786287751415>

Corrección de estilo

Martha Cecilia Caballero Jerez

Diseño y diagramación

Mauricio Raigosa Álvarez

Marcela Londoño Agudelo

Diseño de cubierta

Marcela Londoño Agudelo

Ilustraciones

Tomadas de www.freepik.es

Las ideas y opiniones de este libro son responsabilidad exclusiva de los autores, quienes son igualmente responsables de las citas, referencias y de la originalidad de su obra. En consecuencia, el ITM no responderá ante terceros por el contenido técnico o ideológico del texto ni asume responsabilidad alguna por las infracciones a las normas de propiedad intelectual. Todos los derechos reservados. El texto puede ser reproducido en todo o en parte y por cualquier medio citando la fuente.

Contenido

X

Sobre los autores

xix

Presentación

1

CAPÍTULO 1

**Diseño de un modelo de control de la calidad
usando una técnica de optimización**

Jean P. Morán-Zabala

Ana C. Restrepo-Olarte

Juan M. Cogollo-Flórez

19

CAPÍTULO 2

**Simulación del proceso de producción
con Factory 4.0 desde una perspectiva de DEA**

Diana M. Montoya-Quintero

Olga Lucía Larrea-Serna

57

CAPÍTULO 3

**Selección de técnicas básicas de *Lean*
Manufacturing en pymes del sector
servicios de Medellín**

Diana María Montoya-Quintero

Olga Lucía Larrea-Serna

Lilyana Jaramillo-Ramírez

CAPÍTULO 4**Modelo para la adopción digital de un sistema de gestión del conocimiento para corporaciones de tratamientos psicosociales***Diana M. Montoya-Quintero**Luisa Fernanda Bermúdez**Juan M. Cogollo-Flórez**Luis Fernando Galván*

CAPÍTULO 5**Flexibilización de procesos: una oportunidad para el escalamiento industrial de procesos de laboratorio***Olga Lucía Larrea-Serna**Natalia Correa-Hincapié**Andrés Felipe Montoya-Tobón*

CAPÍTULO 6**Herramienta digital para la toma de decisiones multicriterio en el control de productos y servicios suministrados externamente en pymes de Medellín***Fernando Alberto Cardona-Arango**Diana M. Montoya-Quintero**Javier Iván Hernández-Montoya*

CAPÍTULO 7**Rendimiento y salud en el deporte soportado en inteligencia computacional***Mariana Guzmán-Carmona**Marcela Vallejo**Edilson Delgado-Trejos*

221

CAPÍTULO 8

Medición de la calidad del aire con apoyo en la inteligencia computacional

Mariana Ardila-Liscano

Marcela Vallejo

Edilson Delgado-Trejos

261

CAPÍTULO 9

Tecnologías de purificación de aire con soporte en inteligencia artificial

Érica M. Mesa

Olga P. Bedoya

Paola M. Ortiz

Edilson Delgado-Trejos

295

CAPÍTULO 10

Soft-sensor de caudal soportado en inteligencia computacional

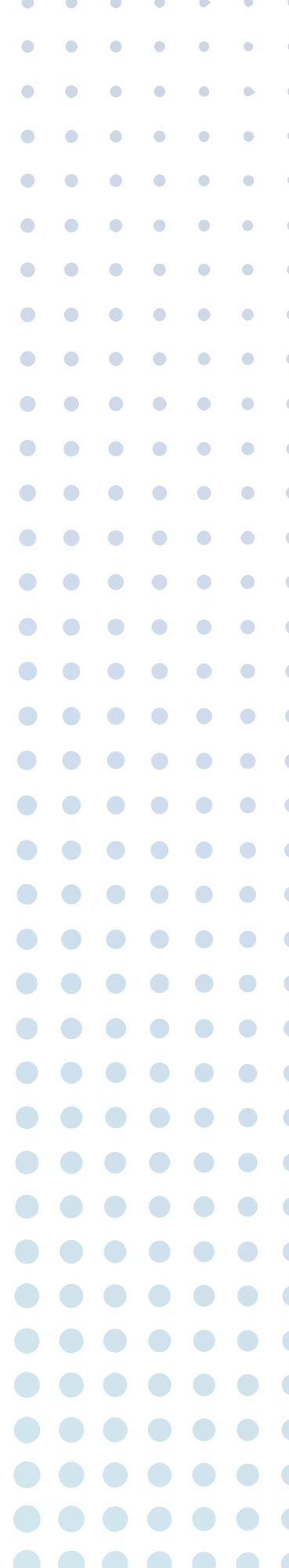
Daniel Gaviria

Jean P. Morán-Zabala

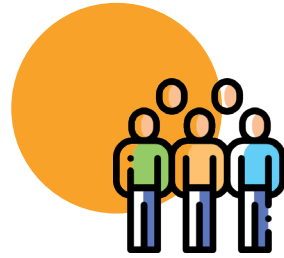
Juan E. Urrea

Marcela Vallejo

Edilson Delgado-Trejos



Sobre los autores



Edilson Delgado-Trejos

Autor-compiler

Es ingeniero electrónico, magíster en Automatización Industrial y doctor en Ingeniería de LI Automática por la Universidad Nacional de Colombia. Fue director del Centro de Investigación, decano de la Facultad de Ingenierías y vicerrector de Investigación y Extensión Académica de la Institución Universitaria ITM. En la actualidad, se encuentra en la primera subcategoría del cuerpo de profesores titulares del ITM. Es líder del grupo de investigación Calidad, Metrología y Producción, del laboratorio AMYSOD y del semillero «Metrología Científica». Sus publicaciones se centran en el análisis no lineal de series temporales, los sistemas de apoyo a la decisión, la inteligencia artificial y la soft metrología. Ha publicado más de 70 artículos científicos, 10 capítulos de libro y 3 libros, en diferentes fuentes reconocidas de divulgación científica.

Cristian Giovanni Gómez-Marin

Compiler

Es profesor adscrito al Departamento de Calidad y Producción de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Institución Universitaria ITM. Se licenció en Ingeniería Industrial, obtuvo el título de Magíster en Administración y se doctoró en Ingeniería Industria y Organizaciones por la Universidad Nacional de Colombia. En la actualidad, es investigador de la línea de investigación «Sistemas logísticos» del Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción. Ha publicado

más de quince artículos científicos y cuatro capítulos de libros de divulgación científica. Sus intereses académicos y científicos se centran en el diseño, modelado y simulación de cadenas de suministro y sistemas logísticos.

Mariana Ardila-Liscano

Es tecnóloga en Control de Calidad por la Institución Universitaria ITM. En la actualidad, estudia desarrollo de software y aspira a aplicar lo aprendido para optimizar procesos y resolver problemas de manera práctica. Le interesan la tecnología y la automatización, y quiere seguir aprendiendo para crecer en el ámbito tecnológico.

Olga Patricia Bedoya-Jiménez

Es ingeniera de Control, magíster en Gestión Energética Industrial y estudiante de doctorado en Educación por la Universidad Nacional de Colombia, el ITM y la UTEL. Desde 2015, es docente de cátedra en la Institución Universitaria ITM y profesora en propiedad de Matemáticas del Magisterio Colombiano. Ha pertenecido al Grupo de Investigación Calidad, Metrología y Producción como docente investigadora en inteligencia artificial y metrología.

Luisa Fernanda Bermúdez

Es licenciada en Tecnología e Ingeniería de la Calidad por la Institución Universitaria ITM. Fue investigadora en prácticas y participó en más de cinco eventos nacionales e internacionales, cuyos trabajos se recopilaron en forma de capítulos de libro.

Fernando Alberto Cardona-Arango

Es docente de la institución universitaria Uniminuto e ingeniero de producción con maestría en Gestión de las Organizaciones de la Institución Universitaria ITM.

Juan M. Cogollo-Flórez

Es doctor en Ingeniería Industria y Organizaciones y magíster en Ingeniería Administrativa por la Universidad Nacional de Colombia. En la actualidad, es profesor titular adscrito al Departamento de Calidad y Producción de la Institución Universitaria ITM. Sus áreas de investigación incluyen el control estadístico de la calidad avanzado, la gestión de la calidad en cadenas de suministro, la medición del desempeño y el modelado de la calidad en procesos.

Natalia Correa-Hincapié

Es ingeniera agroindustrial por la Universidad Pontificia Bolivariana, magíster en Sistemas de Calidad y Productividad por el Tecnológico de Monterrey (México) y doctora en Administración y Desarrollo por la Universidad de Celaya (México). Está vinculada al Departamento de Calidad y Producción de la Institución Universitaria ITM. Ha ejercido como decana de la Facultad de Ingenierías de la Fundación Universitaria Claretiana y como líder de la zona occidente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente. Es investigadora en calidad y educación. Actualmente, es evaluadora académica del CNA en Colombia y asesora en diferentes instituciones para el desarrollo de programas académicos profesionales y de posgrado.

Luis Fernando Galván

Es un profesional especializado. Imparte clases en la Facultad de Ingenierías del Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Es ingeniero industrial por la Universidad de Montería.

Daniel Gaviria

Es tecnólogo en Control de Calidad (2023) y actualmente estudia Ingeniería de la Calidad en la Institución Universitaria ITM. Tiene

una gran pasión por la tecnología y la automatización, y quiere aplicar los conocimientos adquiridos para mejorar procesos y resolver problemas de manera práctica. Forma parte del Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción del ITM, que se centra en el análisis no lineal de series temporales, los sistemas de apoyo a la decisión y la inteligencia artificial, con el objetivo de contribuir al desarrollo tecnológico y a la optimización de procesos industriales.

Mariana Guzmán-Carmona

Es tecnóloga en Control de la Calidad por la Institución Universitaria ITM. Le apasionan los procesos industriales excelentes y el aseguramiento de la calidad. Cuenta con experiencia como técnica especializada en metrología en el laboratorio Equilab Colombia, donde participó en la verificación de equipos y calibraciones conforme a normativas nacionales e internacionales. Está interesada en seguir formándose en sistemas de gestión de calidad, validación de procesos y normativas ISO para contribuir a la mejora continua y la innovación en entornos técnicos y científicos.

Javier Iván Hernández-Montoya

Es ingeniero industrial y magíster en Ingeniería por la Universidad del Valle. Está adscrito del Departamento de Calidad y Producción de la Institución Universitaria ITM como docente. Cuenta con más de diez años de experiencia en docencia universitaria en varias instituciones de educación superior (IES). En estas instituciones, ha ocupado cargos académico-administrativos, como los de coordinador de un programa de Ingeniería Industrial y de una Especialización en Gestión Integral de Proyectos, y ha colaborado en procesos de acreditación de alta calidad a nivel nacional e internacional. En cuanto a su experiencia no docente, ha desempeñado funciones relacionadas con la manufactura, la calidad, la

gestión de operaciones y la gestión de proyectos para varias empresas del departamento del Valle.

Lilyana Jaramillo-Ramírez

Es tecnóloga industrial y administradora de empresas con especialización en Gerencia Integral y maestría en Ingeniería Industrial. Ha sido docente en la Institución Universitaria ITM y en el Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Cuenta con experiencia profesional como jefa de personal de 5H Internacional, C. I. Unirica, e Industrias J. B., y en otros cargos relacionados con la producción y la calidad en empresas de manufactura. Actualmente, es investigadora en el Grupo de Investigación Calidad, Metrología y Producción clasificado en MinCiencias en la categoría A1 y es tutora del Semillero de Investigación SIPRODYM. Tiene experiencia en el acompañamiento de proyectos aplicados en empresas del sector productivo.

Olga Lucía Larrea-Serna

Es ingeniera industrial, tiene una maestría en Economía Informática en Ingeniería y un doctorado en Gestión de la Logística y las Operaciones. Ha realizado investigaciones en optimización, eficiencia productiva y análisis envolvente de datos (DEA). En la actualidad, trabaja como profesora tiempo completo en la Institución Universitaria ITM, donde imparte la asignatura de Planificación y programación de la producción. Su trabajo ha contribuido significativamente al desarrollo de modelos aplicados en la industria colombiana.

Érica M. Mesa

Es tecnóloga en Calidad por la Institución Universitaria ITM. En la actualidad, está cursando la carrera de Ingeniería de la Calidad y un diplomado en Control Interno y Auditoría. Su formación se ha centrado en la mejora continua de procesos

y en la gestión de la calidad, especialmente en la optimización de sistemas de control interno. A través de sus estudios y proyectos, ha adquirido una base sólida en herramientas y metodologías que contribuyen a mejorar la eficiencia y el cumplimiento normativo de las organizaciones.

Diana M. Montoya-Quintero

Es profesional en computación con experiencia en investigación, docencia y desarrollo de soluciones basadas en inteligencia artificial. Ha obtenido un doctorado y una maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática por la Universidad Nacional de Colombia. Gracias a sus investigaciones, ha contribuido al avance de proyectos y artículos relacionados con la minería de datos, el aprendizaje automático y los sistemas basados en el conocimiento, tanto en el ámbito académico como en proyectos aplicados en empresas. Su trayectoria como docente en la Institución Universitaria ITM se ha caracterizado por su compromiso con la formación de profesionales con pensamiento sistemático e investigativo.

Andrés Felipe Montoya-Tobón

Es ingeniero de diseño de productos y tiene una maestría en Ingeniería. Cuenta con amplia experiencia en diseño para la fabricación, modelado asistido por ordenador, fabricación asistida por ordenador, simulaciones, realidad virtual, realidad aumentada y materiales de ingeniería. Posee una gran pasión por la enseñanza y fomenta la innovación. Es investigador activo del grupo de investigación Artes y Humanidades de la Institución Universitaria ITM.

Jean P. Morán-Zabala

Es ingeniero de la calidad por la Institución Universitaria ITM y candidato a magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad

Nacional de Colombia. La Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI) lo reconoció como estudiante destacado y becario del programa Global Research Internship (GRI) del Gobierno canadiense. También cursó estudios de maestría sin tesis en el CIRRELT. Actualmente, es docente de cátedra del Departamento de Ciencias Administrativas del ITM. Sus publicaciones se centran en la investigación de operaciones, el control estadístico avanzado de calidad, la logística sostenible, la optimización, el diseño de experimentos y la modelización matemática.

Paola Maritza Ortiz Grisales

Es ingeniera electrónica por el ITM y magíster en Energía por la Institución Universitaria Pascual Bravo, donde además es docente y forma parte del grupo de investigación GICEI (Grupo de Investigación en Ciencias Electrónicas e Informáticas). También es docente en la Fundación Universitaria ESUMER. Realizó una estancia de investigación en el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas. Ha dirigido proyectos de investigación sobre purificación de aire mediante iones negativos, energías renovables e inteligencia computacional. Tiene registrada una patente de invención para un dispositivo purificador de aire. También ha publicado artículos científicos sobre calidad del aire y energías renovables en revistas indexadas.

Ana C. Restrepo-Olarte

Es ingeniera industrial por la Universidad Autónoma Latinoamericana, especialista en Métodos Administrativos y de Producción, y magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente por la Universidad de Manizales. Desde 2009 hasta la actualidad, ha trabajado como docente ocasional en la Institución Universitaria ITM, donde ha sido tutora del Semillero de Gestión de la Calidad. Sus intereses académicos y

científicos se centran en la gestión y optimización de procesos, los sistemas de gestión de la calidad, las auditorías internas de gestión, los riesgos de gestión y los indicadores de gestión.

Juan E. Urrea

Es ingeniero biomédico y magíster en Ingeniería Biomédica por la Institución Universitaria ITM, donde actualmente está cursando estudios de doctorado. Desde 2024, trabaja como profesor por hora cátedra en el Departamento de Ciencias Aplicadas del ITM y forma parte del Grupo Investigación en Calidad, Metrología y Producción. Su producción académica se centra en el análisis no lineal de series temporales, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y la inteligencia artificial.

Marcela Vallejo

Es ingeniera electrónica y magíster en Ingeniería por la Universidad de Antioquia. Actualmente, es estudiante de doctorado en Ingeniería en el ITM. Ha sido docente en la Universidad de Antioquia, donde estuvo vinculada al grupo de investigación Gepar. También es profesora del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Institución Universitaria ITM e integrante del Grupo de Investigación Calidad, Metrología y Producción, donde es la líder de la línea de investigación en Metrología. Sus intereses se orientan hacia el reconocimiento de patrones, entrenamiento de máquinas de aprendizaje, el acondicionamiento de señales, la soft metrología y la estimación de la incertidumbre.



Presentación



En los procesos de investigación e innovación en las áreas de conocimiento de calidad y metrología se promueven ejercicios y actividades para la generación, apropiación, difusión y uso del conocimiento, constituyéndolos en campos que fundamentalmente se orientan al desarrollo y progreso de los territorios en los ámbitos locales y globales.

Este libro contiene una compilación de avances y aplicaciones de investigación en calidad y metrología con el objetivo de divulgar ejercicios científicos a modo de capítulos de libro desarrollados en el marco de proyectos de investigación, con la integración del trabajo de profesores y estudiantes del programa de Ingeniería de la Calidad de la Institución Universitaria ITM. Cada capítulo de libro evidencia la identificación de problemas, el planteamien-

to de soluciones bajo estructuras metodológicas y experimentales, y el análisis de los resultados orientados a la discusión y conclusiones en ambientes productivos o de servicios. De esta forma, se reúnen en este libro algunos de los procesos de investigación en ciencia, tecnología e innovación (CTeI), concordantes a las actividades de la investigación formativa del grupo de investigación Calidad, Metrología y Producción (CM&P) del Departamento de Calidad y Producción del ITM, alimentando un pensamiento científico para la solución de problemas específicos, con miras a promover el desarrollo tecnológico y científico en el campo de la calidad y la metrología.

El libro está estructurado en dos partes:

1. Avances y aplicaciones en la calidad con soporte en el procesamiento de datos.
2. Avances y aplicaciones de la metrología soportada en la inteligencia computacional.

La primera parte se compone de 6 capítulos:

El capítulo 1, escrito por Morán-Zabala, Restrepo-Olarte y Cogollo-Flórez, se titula «Diseño de un modelo de control de la calidad usando una técnica de optimización», en el que se propone una metodología para el diseño de un modelo de control de calidad en un proceso de fabricación de bebidas, donde se logró una solución factible dentro de un conjunto de soluciones viables para garantizar el cumplimiento de las características de calidad del producto.

El capítulo 2, escrito por Montoya-Quintero y Larrea-Sema, se titula «Simulación del proceso de producción con Factory 4.0

desde una perspectiva de DEA»; allí se plantea la validación de la herramienta de simulación avanzada Factory 4.0 para el proceso de producción de una textilera en función de la evaluación de la eficiencia y productividad de diferentes escenarios de producción, utilizando la técnica de análisis envolvente de datos.

El capítulo 3, escrito por Montoya-Quintero, Larrea-Serna y Jaramillo-Ramírez, se titula «Selección de técnicas básicas de Lean Manufacturing en Pymes del sector servicios de la ciudad de Medellín, Colombia»; en este se presenta la aplicación de herramientas lean a través de las empresas de servicio y la selección de las técnicas lean más útiles para desarrollar el modelo para una empresa innovadora e inteligente, donde la iniciativa en el proceso es preparar a las empresas de este sector para la industria 4.0.

El capítulo 4, escrito por Montoya-Quintero, Bermúdez, Cogollo-Flórez y Galván, se titula «Modelo para la aplicación digital de un sistema de gestión del conocimiento para corporaciones de tratamientos psicosociales», en el que se presenta un modelo para la gestión de un sistema de conocimiento que permite una relación digital en la mejora continua de un caso de estudio para el control de la información y los procesos de alianza externa e interna, a fin de proveer monitoreo de la trazabilidad de la gestión documental y la comunicación digital.

El capítulo 5, escrito por Larrea-Serna, Correa-Hincapié y Montoya-Tobón, se titula «Flexibilización de procesos: una oportunidad para el escalamiento industrial de procesos de laboratorio»; analiza el escalamiento industrial de los procesos para una línea empresarial, de la cual solo se contaba con una estructura en laboratorio para tres productos diferentes con un mismo esquema de diseño. Se partió de un lienzo de negocios, la estructuración de los procesos, la medición del escalamiento industrial y la interacción requerida para cada proceso, obteniendo un mo-

delo de negocio que, a partir del escalamiento de los procesos, identifica las necesidades de la organización en cuanto a equipos, personal, locación e insumos.

La primera parte finaliza con **el capítulo 6** escrito por Cardona-Arango, Montoya-Quintero y Hernández-Montoya, titulado «Herramienta digital para la toma de decisiones multicriterio en el control de productos y servicios suministrados externamente en pymes de la ciudad de Medellín». En este se realiza una propuesta usando herramientas multicriterio para apoyar el proceso de toma de decisiones basada en datos en cuanto al control de procesos, productos y servicios suministrados externamente en pequeñas empresas de la ciudad de Medellín, logrando un impacto funcional orientado a los gerentes de las pymes que, con una interfaz sencilla, permite analizar tanto la priorización de proveedores como los aspectos que se deberían mejorar.

La segunda parte se compone de 4 capítulos:

Se inicia con **el capítulo 7**, escrito por Guzmán-Carmona, Vallejo y Delgado-Trejos, titulado «Rendimiento y salud en el deporte soportado en inteligencia computacional», el cual presenta avances científicos que involucran el entrenamiento de máquinas de aprendizaje en la medición y análisis de posturas, movimientos y gestos de los deportistas, en función de comparar, guiar y evaluar la actividad física de la disciplina deportiva particular, como resultado del ejercicio metrológico en aplicaciones de percepción humana.

El capítulo 8, escrito por Ardila-Liscano, Vallejo y Delgado-Trejos, se titula «Medición de la calidad del aire con apoyo en la inteligencia computacional»; en este se presentan tendencias de investigación sobre el uso de las máquinas de aprendizaje para la medición y predicción de la calidad del aire, por medio de un mapeo sobre

el uso de las rutinas computacionales de regresión y pronóstico en los sistemas de gestión ambiental, con énfasis en las potencialidades, limitaciones, retos y oportunidades de progreso científico, siendo destacable las capacidades que ofrecen las tecnologías de la cuarta revolución industrial y el auge de los sistemas IoT en los ejercicios metrológicos.

El capítulo 9, escrito por Mesa, Bedoya, Ortiz y Delgado-Torres, se titula «Tecnologías de purificación de aire con soporte en inteligencia artificial», en el que se revisan sistemas y modelos de purificación del aire, identificando de los más utilizados, aquellos basados en generaciones de iones y los que se autorregulan integrando conjuntos de mediciones de contaminación ambiental con la toma de decisiones mediante inteligencia artificial, a fin de discutir alrededor de las diversas soluciones.

La segunda parte del libro cierra con **el capítulo 10**, escrito por Gaviria, Morán-Zabala, Urrea, Vallejo y Delgado-Trejos, el cual se titula «*Soft sensor* de caudal soportado en inteligencia computacional», donde se propone el esquema de un *soft sensor* de caudal mediante el uso de técnicas de análisis multirresolución como la descomposición empírica de modos (EMD) y la descomposición por vibraciones de Hilbert (HVD) para lograr un espacio de representación efectivo de la vibraciones que se adquieren en la pared de la tubería por donde circula el caudal, en orden de un sistema de inferencia preciso y robusto. Para el proceso de inferencia se usaron técnicas basadas en regresión *spline* y regresión por vectores de soporte (SVR). Se demuestra que la combinación de la inteligencia computacional con los sensores de vibración se convierte en una integración prometedora para la creación de *soft sensores* de caudal, lo cual debe incluir el aseguramiento del modelo de medición mediante la aplicación de la *soft-metrología*.



Capítulo 01

Diseño de un modelo de control de la calidad usando una técnica de optimización

Designing a Quality Control Model Using an Optimization Technique

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.01>

Jean P. Morán-Zabala ¹

Ana C. Restrepo-Olarte ²

Juan M. Cogollo-Flórez ³

¹ Profesor de cátedra. Departamento de Ciencias Administrativas, 050034, Medellín, Colombia. ORCID 0000-0002-0929-248X, correo electrónico jeanmoran281289@correo.itm.edu.co

² Profesora ocasional tiempo completo. Departamento de Calidad y Producción, 050034, Medellín, Colombia. ORCID 0000-0001-7635-9181, correo electrónico anarestrepo@itm.edu.co

³ Profesor titular. Departamento de Calidad y Producción, 050034, Medellín, Colombia. ORCID 0000-0002-6101-3134, correo electrónico juancogollo@itm.edu.co

Resumen. El control de la calidad (cc) tiene como objetivo garantizar el cumplimiento de las especificaciones o estándares de un producto o servicio desde su fabricación, buscando reducir la probabilidad de incorporar productos con fallas en el mercado. El cc permite evaluar la eficiencia de los sistemas y con ello determinar los procedimientos susceptibles de mejora o corrección. Las causas de desviaciones de las especificaciones objetivo y la presencia de errores en la fabricación de productos pueden deberse a causas internas o externas. Con frecuencia, la identificación de variables y factores de control en los procesos es bastante compleja, por lo que es necesario integrar nuevas metodologías, técnicas y herramientas que actualicen y complementen el análisis tradicional de variables de proceso. Este trabajo desarrolla una metodología para el diseño de un modelo de control de calidad de procesos usando una técnica de optimización. La aplicación metodológica en un proceso de fabricación de bebidas permitió obtener una solución factible dentro del conjunto de soluciones viables para dar cumplimiento al modelo de control de la calidad que garantiza el cumplimiento de las características de calidad del producto.

Palabras clave: control de la calidad, ingeniería de la calidad, mejoramiento de procesos, optimización, programación por metas.

Introducción



El control de la calidad (CC) se basa en la medición de las variables y/o atributos de un producto, la comparación con las normas o especificaciones y la actuación sobre la diferencia obtenida. El CC es parte del Sistema Integral de Gestión de Calidad (SGC) definido y estandarizado por la Organización Internacional de Normalización (ISO) [1].

Las técnicas de optimización, en conjunción con los sistemas informáticos y el aprendizaje automático, se han convertido en una herramienta para diagnosticar y solucionar problemas complejos [2]. La optimización en la planificación del CC está orientada a establecer las variables a controlar, las frecuencias de las mediciones, los puntos de muestreo, los sistemas y metodologías de ensayo y los límites de control [3].

El diseño de modelos para inspeccionar y dar valor a los productos nace de la necesidad de mejorar la productividad, con el fin de evitar la presencia de productos defectuosos en los sistemas productivos o en su entrega a los clientes. El problema principal se centra en la identificación de soluciones óptimas para los niveles de entrada y las variables de proceso que cumplan con todas las especificaciones de las características de calidad, sujeto a una o múltiples restricciones mediante la utilización de técnicas de optimización. En caso de que no exista una solución óptima para los modelos propuestos, se busca la mejor solución de compromiso dentro del conjunto de soluciones factibles [4].

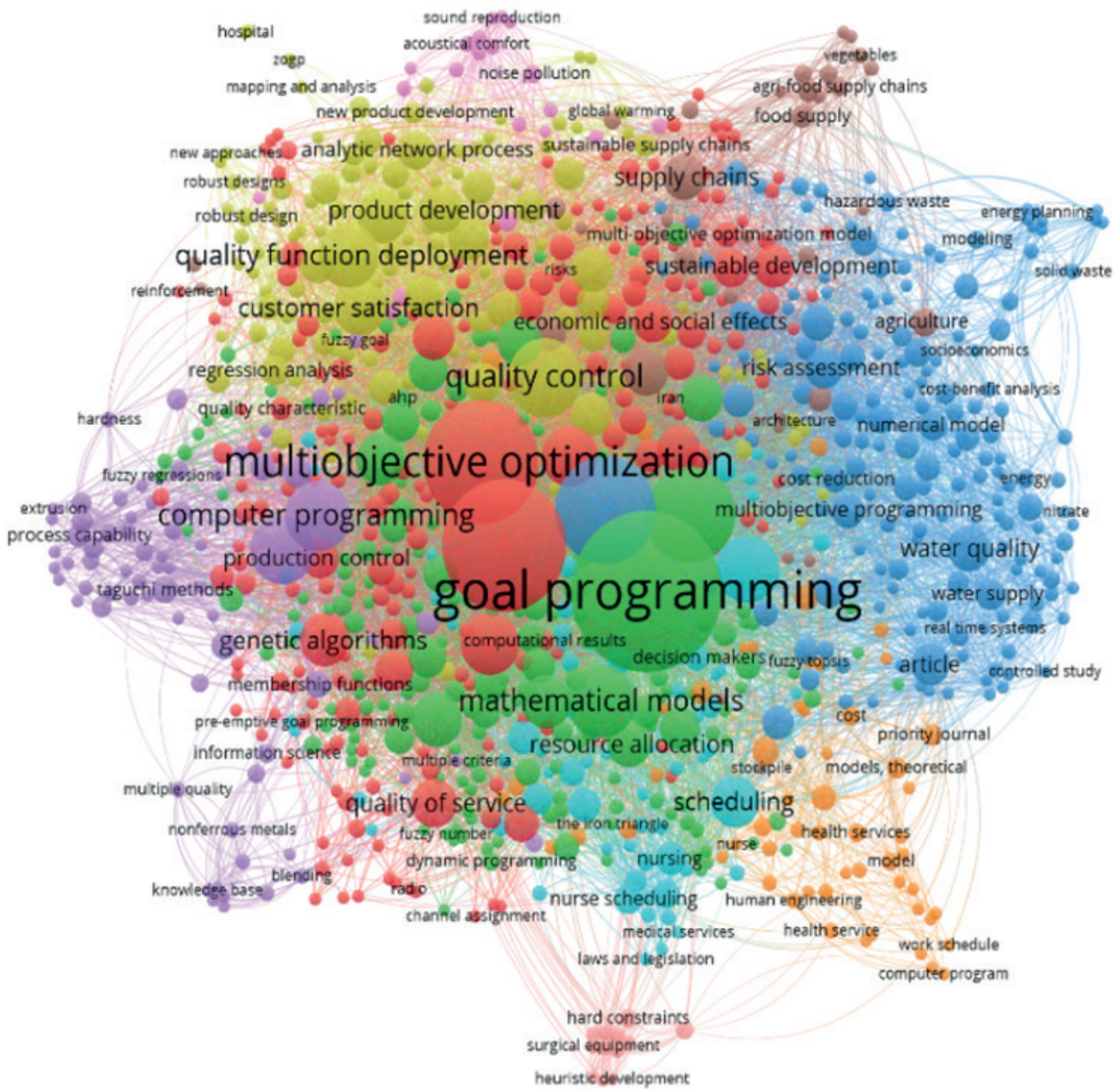
La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de una metodología de modelado flexible de optimización para resolver problemas complejos de ingeniería. Esto permite optimizar características de calidad y, por lo tanto, eliminar o reducir las desviaciones del cumplimiento de las especificaciones objetivo para mejorar la toma de decisiones en la gestión de procesos.

1.2 Marco referencial

La búsqueda de trabajos previos se realizó considerando artículos publicados en revistas seriadas e indexadas entre 2002 y 2022. Se llevó a cabo un análisis bibliométrico para conocer la relación entre el control de la calidad y las técnicas de optimización. La búsqueda se efectuó en las bases de datos Science Direct, IEEE, Emerald, Google Scholar y Scopus. En la figura 1.1 se muestra el mapa bibliométrico para la ecuación de búsqueda general en el que se evidencia la relación entre el control de la calidad, los modelos matemáticos, la programación por metas, la programación multiobjetivo y la satisfacción del consumidor.

Además, en la figura 1.2 se detalla el número de publicaciones por año a partir de la ecuación general, y se demuestra que hay una tendencia creciente en el desarrollo de investigaciones afines a la temática en el periodo considerado.

Figura 1.1. Mapa bibliométrico de la ecuación general para la relación entre optimización y control de la calidad



Fuente: elaboración propia mediante VosViewer

Figura 1.2. Publicaciones por año de la relación entre optimización y control de la calidad



Fuente: elaboración propia con base en resultados de Scopus.

Programación por metas (PM)

La programación por metas (PM) o programación por objetivos (GP) considera la prioridad de objetivos como precisa y determinística; sin embargo, es uno de los problemas comunes en el control de la calidad de procesos (CCP), dado que requiere fijar los niveles de los parámetros de entrada para cumplir con la especificación requerida. Cuando una salida posee muchas características de calidad, y cada una de ellas satisface una especificación dada, la dificultad para controlar la variación puede aumentar [5].

La toma de decisiones es un proceso complejo que crea nuevos retos para las organizaciones y para la comunidad científica; invita a realizar un enfoque de modelos y herramientas de optimización que faciliten la toma de decisiones. Por esto, es importante desarrollar un entorno tecnológico que permita a las partes inte-

resadas gestionar sus decisiones colectivas para formalizar, estandarizar y aumentar la efectividad de los procedimientos para el CCP mediante la aplicación de herramientas de optimización que mejoren las metas establecidas [6]. Así, es necesario considerar la incertidumbre propia de las metas involucradas en la toma de decisiones gerenciales [7].

Generalmente, existe, al mismo tiempo, más de una característica de calidad por optimizar en los procesos, dado que las variables respuesta pueden diferir en propiedades como la unidad de medida, la escala y las formas de medición. Partiendo de que las organizaciones tienen procedimientos de control de la calidad (CC) formalizados, se han desarrollado modelos de programación de objetivos cero para ayudar a seleccionar el mejor conjunto de herramientas de CC para las características de calidad [8].

Las incertidumbres poseen prioridades objetivas como su escala económica y ambiental, pero estas pueden generar dificultades en las decisiones eficientes de gestión. Para solucionar este problema, se ha aplicado un enfoque de programación por metas difusa (FGP) para la planificación óptima de sistemas de gestión de residuos sólidos, cuantificando los objetivos difusos en la toma de decisiones [9].

La construcción de modelos y problemas de optimización posee diversos enfoques [10]. Dado el gran alcance de la PM, se han aplicado modelos de programación variable de objetivos (PVO) (0.1) [5] y de programación objetiva lineal (POL) [11] para mejorar la toma de decisiones en la planificación de minas de carbón a cielo abierto, a corto y mediano plazo. En gran parte de los aspectos prácticos, los diseños experimentales óptimos son la mejor herramienta para abordar la varianza de la predicción, a fin de mejorar el rendimiento e impactar la calidad, por lo que para encontrar factores controlables es necesario adoptar modelos lexi-

cográficos de PM en los que se incorporen diseños experimentales [12].

Asimismo, se ha aplicado PM para el control de la calidad de agua mediante la inspección de sólidos totales disueltos y pronosticar la oferta y demanda de Arabia Saudita para el periodo 2020-2050, con un intervalo de ± 10 años [13]. Minimizar las variables involucradas en el control de procesos se convierte en un factor clave para la sostenibilidad industrial. El uso de la metodología de superficie de respuesta y PM para determinar la combinación óptima de las características de calidad en el sector de combustibles ha permitido cuantificar el número de horas requeridas a una temperatura adecuada para producir aceite, cumpliendo con los límites de especificación establecidos [14].

La optimización PM, integrada con control estadístico, permite mejorar los índices de capacidad de proceso para los pesos medios, alturas, diámetros y volúmenes de productos, reduciendo los desperdicios, el costo del producto terminado y mejorando la satisfacción del cliente [15]. También, se ha propuesto un modelo difuso de programación por metas (FGP) para determinar las combinaciones de valores óptimos y comparar las alternativas del diseño del producto, estableciendo valores finales para la toma de decisiones de cada objetivo en entornos desconocidos e inexactos [16].

En CC, las entradas son procesadas para optimizar una o varias variables respuesta. Dichas variables deben satisfacer una serie de características de calidad, conociendo el rango de operación de cada variable de entrada y los límites de las variables del proceso. Es necesario proponer un modelo lexicográfico de referencia para formular la PM, clasificando los objetivos de acuerdo con su nivel de importancia.

Para formular el problema como modelo de PM, se requieren los siguientes pasos [17]:

- a. Modificación de la forma de especificación por medio de la variable aleatoria x_i , con respecto al límite de especificación superior (LES) y el límite de especificación inferior (LEI):

$$x' = x_i - LES \leq (LES - LEI) \quad (1)$$

- b. Ajuste de la ecuación de regresión, donde C es el coeficiente, R' es la variable de entrada y x'_m son las restricciones de la ecuación.

$$Y_n' = C + R' + X'_1 + X'_2 + X'_3 \dots X'_m \quad (2)$$

Luego, el problema se reduce a minimizar la suma de las variables de desviación (δ_m^- y δ_m^+) de la meta sujeta a restricciones, teniendo en cuenta la prioridad de factores (l, k, r). Para las soluciones unilaterales, solo existirán las variables de desviación positiva o negativa y para las especificaciones «cerca de» es necesario considerar ambas desviaciones [4].

De esta forma, se plantea el problema de control de procesos como un problema lexicográfico de PM, como se detalla a continuación [17]:

$$\text{Min} \sum_{m=1}^{lkr} (\delta_m^- - \delta_m^+) \quad (3)$$

Sujeto a

restricción objetivo de entrada:

$$R'_i + \delta_{R'_i}^- - \delta_{R'_i}^+ = z'_{x_i} \text{ (para } i = 1, 2, \dots, r) \quad (4)$$

restricciones objetivo del proceso:

$$x'_j + \delta_{x_j}^- - \delta_{x_j}^+ = z'_{x_j} \text{ (para } i = 1, 2, \dots, r) \quad (5)$$

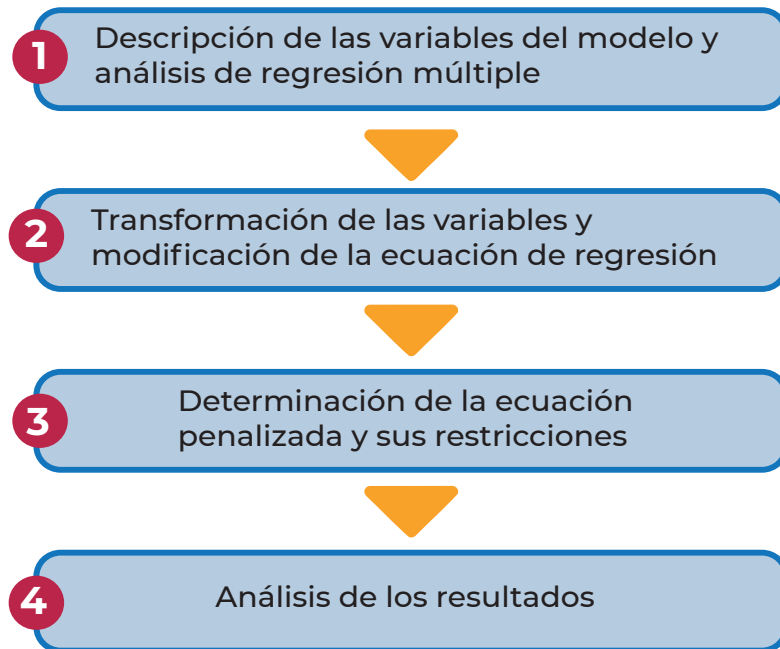
restricciones objetivo de las características de calidad:

$$Y'_i + \delta_{Y_k}^- - \delta_{Y_k}^+ = z'_{Y_k} \text{ (para } i = 1, 2, \dots, r) \quad (6)$$
$$Y'_i, x'_j \text{ y } R'_i \geq 0$$

1.3 Metodología

Consta de cuatro etapas (véase la figura 1.3) y fue aplicada en una empresa fabricante de bebidas de la ciudad de Medellín. En primera instancia, se describen las variables del modelo y se realiza un análisis de regresión múltiple. Luego, se transforman las variables y se modifica la ecuación de regresión obtenida. Después, se determina la ecuación penalizada y las restricciones asociadas y, por último, se analizan los resultados obtenidos.

Figura 1.3. Pasos de la metodología



Fuente: elaboración propia.

1.4 Resultados

En la siguiente sección se detallan los resultados de la metodología propuesta en el apartado 3.

1.4.1 Descripción de las variables del modelo y análisis de regresión múltiple

Esta aplicación corresponde a la fase 1 de aplicación de un programa de control estadístico de procesos (CEP) con rangos de estudio preliminares. El ideal se centra en encontrar el nivel óptimo de cada una de las variables del proceso; estas pueden ser medidas directamente y, por ende, son controlables.

Los grados Brix del jarabe son esenciales para producir bebidas carbonatadas. La característica de calidad objeto de estudio es el contenido neto de la bebida carbonatada. La variable de entrada es la concentración de azúcar del jarabe, medida en grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$). Las variables del proceso son la temperatura del carboenfriador ($^{\circ}\text{C}$), la temperatura de la llenadora ($^{\circ}\text{C}$), la velocidad de la llenadora (BPM) y la presión de succión del refrigerante (PSI). La variable de salida del modelo de optimización corresponde a una característica de calidad del producto terminado, identificada como el contenido neto medido en mililitros. Los detalles de la variable de entrada, las variables del proceso y la característica de calidad se dan en la tabla 1.1.



Tabla 1.1. Descripción de las variables del modelo

Caracterización	Variable	Representación	Especificación	Tipo de variable
Variable de entrada	Grados Brix del jarabe (%)	X	[55.2, 55.9]	Continua
Variables de proceso	Temperatura en el carboenfriador (°C)	R ₁	[1, 2]	Continua
	Temperatura de la llenadora (°C)	R ₂	[3, 7]	Continua
	Velocidad de la llenadora (BPM)	R ₃	[520, 540]	Continua
	Presión de succión del refrigerante (Psi)	R ₄	[42, 46]	Continua
Característica de calidad	Contenido neto (ml)	Y	[182, 202]	Continua

Fuente: elaboración propia.

Se llevó a cabo un estudio de capacidad de proceso con 30 muestras de tamaño 4, tomadas al azar. Se realizó una regresión lineal múltiple, obteniendo la siguiente relación:

$$Y = 300.13 - 0.26X + 0.96R_1 + 2.26R_2 - 0.19R_3 - 0.01R_4 \quad (7)$$

1.4.2 Transformación de variables y modificación de la ecuación de regresión

Para establecer el problema de PM, el primer paso fue reformular las especificaciones de las variables del proceso y modificar los términos constantes en la ecuación (7). Las transformaciones de las variables, aplicando (1), son:

$$X' = X - 55.2 \leq 0.7 \quad (8)$$

$$R'_1 = R_2 - 1 \leq 1 \quad (9)$$

$$R'_2 = R_2 - 3 \leq 4 \quad (10)$$

$$R'_3 = R_3 - 520 \leq 20 \quad (11)$$

$$R'_4 = R_4 - 42 \leq 20 \quad (12)$$

Así, la ecuación de regresión modificada, aplicando (2), es:

$$Y' = 200.28 - 0.26X' + 0.96R'_1 + 2.26R'_2 - 0.19R'_3 - 0.01R'_4 \quad (13)$$

1.4.3 Determinación de la ecuación penalizada y restricciones

La determinación del problema lexicográfico de PM de la ecuación penalizada con la característica de calidad, P_{Y_i} , de las variables del proceso, P_{X_k} , y de la variable de entrada 2, se expresa así:

$$\text{Min } P_{Y_i} \sum_{i=0}^r (\delta_{Y_i}^- - \delta_{Y_i}^+) + P_{X_k} \sum_{j=0}^r (\delta_{X_j}^- - \delta_{X_j}^+) + P_{R_i} \sum_{t=0}^r (\delta_{R_t}^- - \delta_{R_t}^+) \quad (14)$$

Luego, en (15) se desglosa la ecuación penalizada y se detalla la minimización para cada una de las variables del modelo.

$$\text{Min } z: P_{Y_1} (\delta_{Y_1}^-) (\delta_{Y_1}^+) + P_{R_1} (\delta_{R_1}^-) (\delta_{R_1}^+) + P_{R_2} (\delta_{R_2}^-) (\delta_{R_2}^+) + P_{R_3} (\delta_{R_3}^-) (\delta_{R_3}^+) \\ + P_{R_4} (\delta_{R_4}^-) (\delta_{R_4}^+) + P_X (\delta_{X_1}^-) (\delta_{X_1}^+) \quad (15)$$

Sujeto a

restricción objetivo de entrada:

$$X' + \delta_{X'}^- + \delta_{X'}^+ = 0.7 \quad (16)$$

restricciones objetivo del proceso:

$$R'_1 + \delta_{R'_1}^- + \delta_{R'_1}^+ = 1 \quad (17)$$

$$R'_2 + \delta_{R'_2}^- + \delta_{R'_2}^+ = 4 \quad (18)$$

$$R'_3 + \delta_{R'_3}^- + \delta_{R'_3}^+ = 20 \quad (19)$$

$$R'_4 + \delta_{R'_4}^- + \delta_{R'_4}^+ = 4 \quad (20)$$

restricciones objetivo de las características de calidad:

$$Y + \delta_Y^- - \delta_Y^+ = 200; \quad \text{i.e.}$$

$$- 0.26X' + 0.96R'_1 + 2.26R'_2 - 0.19R'_3 - 0.01R'_4 = 0.28 \quad (21)$$

Posterior a la minimización del problema lexicográfico de PM descrito en (15), es necesario asegurar que las restricciones (8), (9), (10), (11) y (12) garanticen el cumplimiento de X , R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , respectivamente. Las soluciones obtenidas permiten mostrar el cumplimiento óptimo del modelo de CCP, desarrollado mediante la aplicación de una técnica de optimización (tabla 1.2).

Tabla 1.2. Estructura final del modelo de control de la calidad del proceso

Variable	Valor esperado	LEI	Solución encontrada	LES
X	55.5 %	55.2 %	55.2 %	55.9 %
R_1	2°C	1°C	1°C	2°C
R_2	5°C	3°C	3°C	7°C
R_3	530 BPM	520 BPM	520 BPM	540 BPM
R_4	44 PSI	42 PSI	42 PSI	46 PSI
Y	192 ml	182 ml	194.3 ml	202 ml

Fuente: elaboración propia.

1.5 Conclusiones

La optimización de procesos soporta la toma de decisiones y está orientada a reducir costos y mejorar la eficiencia, obteniendo así el mayor beneficio posible. Una de las principales ventajas de la PM es la flexibilidad en la toma de decisiones al poder experimentar con cantidades de variaciones de restricciones y prioridades de objetivos. El elemento diferenciador de este artículo es la aplicación de un modelo lexicográfico integrando una herramienta de optimización. Esta temática es relevante para la ingeniería de

la calidad y su contribución a la mejora continua de las organizaciones, con base en métodos cuantitativos avanzados.

Los trabajos futuros se centrarán en la aplicación del modelo propuesto en otras industrias y la adopción de herramientas de simulación, con el fin de traer beneficios evidentes en los procedimientos de ingeniería al proporcionar nuevos conocimientos, habilidades y destrezas en el campo, siendo importantes y notables en el contexto actual de la cuarta revolución industrial y la inteligencia artificial (IA).

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses de índole comercial, contractual o relacionados con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

La presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, del entorno, de la sociedad o del medioambiente.



Referencias

- [1] J. O. Westgard and S. A. Westgard, "Quality control review: implementing a scientifically based quality control system," *Ann. Clin. Biochem.*, vol. 53, no. 1, pp. 32–50, 2016, doi: 10.1177/0004563215597248.
- [2] G. San-Payo, J. C. Ferreira, P. Santos, and A. Martins, "Machine learning for quality control system," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 11, no. 11, pp. 4491–4500, 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01640-4.
- [3] J. Pang, N. Zhang, Q. Xiao, F. Qi, and X. Xue, "A new intelligent and data-driven product quality control system of industrial valve manufacturing process in CPS," *Comput. Commun.*, vol. 175, pp. 25–34, 2021, doi: 10.1016/j.comcom.2021.04.022.
- [4] M. S. Cherif, H. Chabchoub, and B. Aouni, "Quality control system design through the goal programming model and the satisfaction functions," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 186, no. 3, pp. 1084–1098, 2008, doi: 10.1016/j.ejor.2007.04.025.
- [5] Y. D. Zhang, Y. P. Cheng, and J. Su, "Application of goal programming in open pit planning," *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.*, vol. 7, no. 1, pp. 41–45, 1993, doi: 10.1080/09208119308964683.
- [6] B. Aouni and O. Kettani, "Goal programming model: A glorious history and a promising future," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 133, no. 2, pp. 225–231, 2001, doi: 10.1016/S0377-2217(00)00294-0.
- [7] M. J. Schniederjans and C. M. Karuppan, "Designing a quality control system in a service organization: A goal programming case study," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 249–258, 1995, doi: 10.1016/0377-2217(94)00239-9.
- [8] B. Aouni, J. M. Martel, and A. Hassaine, "Fuzzy goal programming model: An overview of the current state-of-the-art," *J. Multi-Crit. Decis. Anal.*, vol. 16, no. 5–6, pp. 149–161, 2009, doi: 10.1002/mcda.448.

- [9] N.-B. Chang and S. F. Wang, "A fuzzy goal programming approach for the optimal planning of metropolitan solid waste management systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 99, no. 2, pp. 303–321, 1997, doi: 10.1016/S0377-2217(96)00024-0.
- [10] R. B. Kazemzadeh, M. Bashiri, A. C. Atkinson, and R. Noorossana, "A general framework for multiresponse optimization problems based on goal programming," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 189, no. 2, pp. 421–429, 2008, doi: 10.1016/j.ejor.2007.05.030.
- [11] E. K. C. Chanda and K. Dagdelen, "Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems," *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.*, vol. 9, no. 4, pp. 203–208, 1995, doi: 10.1080/09208119508964748.
- [12] A. Ozdemir, "An I-optimal experimental design-embedded nonlinear lexicographic goal programming model for optimization of controllable design factors," *Eng. Optim.*, vol. 53, no. 3, pp. 392–407, 2021, doi: 10.1080/0305215X.2020.1732365.
- [13] A. A. Musa, "Goal programming model for optimal water allocation of limited resources under increasing demands," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, no. 4, pp. 5956–5984, 2021, doi: 10.1007/s10668-020-00856-1.
- [14] D. A. N. Nuriani and I. Gunawan, "Recycling solid waste of coconut oil industry: A response surface-goal programming approach," *J. Syst. Integr.*, vol. 19, no. 2, pp. 111–121, 2020, doi: 10.25077/josi.v19.n2.p111-121.2020.
- [15] H. Gholizadeh and A. Tajdin, "Optimizing and evaluating performance quality control of the production process of disposable essentials using approach vague goal programming," *J. Ind. Prod. Eng.*, vol. 36, no. 4, pp. 258–270, 2019, doi: 10.1080/21681015.2019.1646330.
- [16] E. K. Delice and Z. Güngör, "Determining design requirements in QFD using fuzzy mixed-integer goal programming: Application of a decision support system," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 21, pp. 6378–6396, 2013, doi: 10.1080/00207543.2013.803625.
- [17] S. Sengupta, "Goal programming approach to a type of quality control problem," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 32, no. 3, pp. 207–211, 1981, doi: 10.1057/jors.1981.43.



Capítulo 02

Simulación del proceso de producción con Factory 4.0 desde una perspectiva de DEA

Simulation of the Production Process with Factory 4.0 from a DEA Perspective

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.02>

Diana M. Montoya-Quintero ¹
Olga Lucía Larrea-Serna ²

¹ Docente investigadora, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID 0000-0003-0761-4067, correo electrónico dianamontoya@itm.edu.co

² Docente investigadora, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID 0000-0003-3261-1247, correo electrónico olgalarrea@itm.edu.co

Resumen. En este trabajo se presenta la validación de la herramienta de simulación avanzada Factory 4.0 para el proceso de producción de una textilería en función de la evaluación de la eficiencia y productividad de diferentes escenarios de producción mediante la técnica de análisis envolvente de datos (DEA). Para esto, se desarrolló el *software* Factory 4.0 en diferentes escenarios; luego, se realizó una evaluación de eficiencia, se identificaron los procesos ineficientes y se aplicó la aplicación en reingeniería de procesos de negocio. Factory 4.0 proporcionó una simulación precisa del proceso de producción de camisetas, lo que permitió evaluar la eficiencia y la productividad en diferentes escenarios. Mediante el análisis envolvente de datos, se identificaron y resolvieron las ineficiencias del proceso, lo que mejoró la calidad y el rendimiento. Además, se demostró que este enfoque integral se puede aplicar a la reingeniería de procesos de negocios para optimizar los sistemas de manufactura en diversas industrias. La mejora de la eficiencia en la producción de bienes es esencial, especialmente durante situaciones de emergencia de producción, cuando la demanda puede ser crítica para la sociedad. Por eso, esta mejora supone una mayor disponibilidad de productos de calidad, lo que contribuye a la seguridad y el bienestar de la población.

Palabras clave: análisis envolvente de datos, eficiencia, Factory 4.0, proceso de producción, reingeniería de procesos, simulación.

Introducción



La simulación se ha convertido en una herramienta esencial para el diseño y análisis de sistemas complejos, que no pueden describirse fácilmente mediante modelos analíticos o matemáticos [1]. Utilizada en diversas áreas como la fabricación, el transporte, la logística, las redes de comunicación, la atención sanitaria y el ejército, la simulación permite calcular estadísticas de utilización, encontrar cuellos de botella, señalar errores de programación y crear programas de fabricación. Este enfoque es crucial en la manufactura moderna, en la que se busca continuamente mejorar tanto los productos como los sistemas de producción para mantenerse competitivos y eficientes [2].

En [3] se presenta un estudio de caso y se señalan las posibilidades de utilizar la simulación por ordenador, con el fin de aumentar la eficiencia y la eficacia de la producción personalizada de una

empresa. El objetivo es analizar el flujo de materiales en el proceso de producción y luego crear una simulación para determinar la duración de la producción e identificar cuellos de botella que se presenten. Para tener una mejor idea de dicho proceso, se desarrolló un modelo de simulación en la herramienta de *software* seleccionada como un proyecto de producción personalizado en las condiciones de una empresa en particular. El orden de frecuencia más alto en el programa de producción de la empresa se utiliza para crear el flujo de materiales.

De otro lado, en [4] se define un modelo de simulación paramétrica integrada para la gestión de la integración, mejorando el proceso de producción y mantenimiento en el que se desarrolla un marco para adoptar modelos de simulación que ayuden a los gerentes de producción y mantenimiento a tomar decisiones rentables, así como a optimizar el uso de los recursos. El enfoque de dinámica de sistemas se utiliza para simular, valiéndose del *software* PowerSim, el comportamiento no lineal de los sistemas complejos analizados a lo largo del tiempo. Los resultados revelaron que el procedimiento de optimización de simulación propuesto se puede utilizar para resolver y gestionar la complejidad en «tiempo real»; además, le dan al tomador de decisiones el escenario más probable.

En [5] se sugirió la integración de herramientas y tecnologías de Lean Manufacturing 4.0, teniendo en cuenta las perspectivas del sector industrial en la era digital. Utilizando una metodología de tres pasos, que incluyó un mapeo tecnológico e industrial, se identificaron 25 puntos de sinergia. Mediante la interacción de las herramientas de Lean Manufacturing, principalmente con Big Data Analytics, la nube, simulación virtual y realidad aumentada, se elaboraron diagramas circulares multinivel que destacaron las principales contribuciones de Just in Time 4.0 (JIT 4.0), Kaizen 4.0, Kanban 4.0, Poka-Yoke 4.0, Value Stream Mapping 4.0 (VSM 4.0) y Mantenimiento Productivo Total 4.0 (TPM 4.0). Asimismo, se

identificaron cinco atributos de Lean 4.0, resaltando la integración entre procesos, dispositivos y partes interesadas, la minimización de residuos y la autonomía, lo que sugiere beneficios para la organización a partir de este enfoque de integración holística.

El uso de modelos matemáticos no es adecuado para la optimización de líneas de producción; la simulación conduce a mejores resultados y proporciona más flexibilidad que los modelos matemáticos. Por lo tanto, en [6], se desarrolló una metodología novedosa basada en la integración de simulación y análisis envolvente de datos para la optimización del rendimiento de una línea de producción farmacéutica. Para esto, en primer lugar, se simuló, verificó y validó una línea de producción farmacéutica real. Posteriormente, se desarrolló el análisis envolvente de datos (DEA) para la exploración de escenarios. Finalmente, se identificó el peso de cada indicador mediante la prueba t pareada. Los resultados sugirieron que todos los indicadores son significativos en la unidad de producción. El modelo de optimización indicó que ciertas entradas y salidas debían mejorarse para optimizar el rendimiento de la unidad farmacéutica.

En respuesta al incremento de la demanda de camisetas en las textilerías, la ciudad de Medellín ha experimentado un auge en la producción de este insumo sanitario vital. Sin embargo, la rápida expansión de la producción ha puesto de manifiesto la necesidad de optimizar los procesos de fabricación para asegurar la calidad y eficiencia. En este contexto, se desarrolla Factory 4.0, un *software* de simulación diseñado específicamente para una empresa de camisetas. Este *software* simula el flujo de trabajo en cuatro áreas clave: recepción, producción, distribución y análisis de información. La motivación detrás de este estudio radica en la urgente necesidad de abordar la ineficiencia y los problemas de calidad en el proceso de producción de camisetas, incrementados por la repentina y masiva demanda causada en una textilería.

Aunque existen diversas herramientas de simulación en el mercado, muchas de ellas no ofrecen un nivel de realismo y detalle suficientes para un análisis y rediseño exhaustivo de los sistemas de producción. Además, la integración de técnicas avanzadas como el análisis envolvente de datos (DEA), en el contexto de la simulación de manufactura, sigue siendo limitada [7]. Este estudio busca llenar ese vacío al proporcionar una solución integral que no solo simule el proceso de producción con alta precisión, sino que también permita una evaluación detallada de la eficiencia operativa. La tecnología de simulación aplicada en Factory 4.0 facilita la evaluación de diversos escenarios de producción y permite un análisis exhaustivo de la productividad y calidad en cada etapa del proceso. Utilizando la técnica de análisis envolvente de datos (DEA), Factory 4.0 analiza la eficiencia de diferentes turnos, máquinas y trabajadores, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y la mejora continua del proceso productivo. Además, la creciente popularidad de la simulación en la reingeniería de procesos de negocio (BPR) destaca su potencial para crear nuevas formas de hacer negocios, mediante el replanteamiento y rediseño radical de sistemas empresariales para lograr mejoras significativas en el desempeño [8].

El presente estudio tiene como objetivos validar el Factory 4.0 como una herramienta de simulación avanzada para el proceso de producción de camisetas, evaluar la eficiencia y productividad de diferentes escenarios de producción utilizando la técnica de análisis envolvente de datos (DEA), identificar y resolver ineficiencias en el proceso de producción mejorando la calidad y rendimiento mediante la simulación y proporcionar un modelo integral que pueda ser aplicado en la reingeniería de procesos de negocio (BPR) para optimizar otros sistemas de manufactura en distintas industrias.

2.1 Marco referencial

2.1.1 Herramientas de simulación para procesos de producción

Las herramientas de simulación de procesos de producción son modelos informáticos que analizan y mejoran los procesos de negocio. Permiten a las empresas explorar escenarios hipotéticos, identificar áreas de mejora y analizar el impacto de los cambios en los procesos. Las herramientas de simulación también pueden ayudar a los fabricantes a identificar problemas y diseñar soluciones [9]. Estas herramientas crean modelos detallados de las diferentes etapas y componentes del proceso de producción, incluyendo maquinaria, estaciones de trabajo, flujos de materiales y personal [10]. Además, facilita la simulación de múltiples escenarios para evaluar el impacto de cambios en el proceso como la variación en la demanda, fallas de máquinas o cambios en la disposición de la línea de producción, y ayuda a identificar puntos de ineficiencia o cuellos de botella en el proceso, que pueden estar limitando la capacidad de producción. Adicionalmente, se puede experimentar con diferentes distribuciones de recursos (como trabajadores, máquinas y materiales) para encontrar la combinación más eficiente. Genera datos y estadísticas sobre el rendimiento del proceso como tiempos de ciclo, tasas de utilización de equipos y tasas de defectos, lo cual es crucial para el análisis y la toma de decisiones [11]. Algunas herramientas pueden integrar métodos avanzados como el análisis envolvente de datos (DEA) para evaluar la eficiencia relativa de diferentes unidades o procesos dentro del sistema [12].

En la actualidad, las herramientas de simulación para la producción han avanzado significativamente, integrando tecnologías modernas y metodologías evolucionadas para ofrecer soluciones más precisas y eficientes. Algunas de las herramientas y

tecnologías modernas están orientadas a la simulación basada en eventos discretos (DES), que es una metodología ampliamente utilizada en la industria y la academia para modelar y analizar complejos sistemas de producción [13]. Herramientas como Arena y Simul8 son ejemplos destacados en este campo; Arena es reconocida por su versatilidad y amplio uso en diversas aplicaciones industriales y académicas, mientras que Simul8 es apreciada por su facilidad de uso y robustas capacidades para modelar procesos de producción [14]. Las herramientas de simulación continua y de plantas en 3D han avanzado notablemente en la modelización de sistemas complejos y en la optimización de procesos de manufactura [15]. AnyLogic es una herramienta versátil que combina simulación basada en eventos discretos, dinámica de sistemas y agentes, ofreciendo una amplia capacidad de modelado [16]. Siemens Tecnomatix Plant Simulation y FlexSim permiten la simulación en 3D de plantas completas, facilitando la visualización detallada y el análisis de los flujos de trabajo para optimizar los *layouts* de producción [17]. Además, los gemelos digitales, como PTC ThingWorx y Siemens Digital Twin integran simulación con datos en tiempo real, creando réplicas digitales precisas de los sistemas de producción físicos, lo que sirve para optimizar el rendimiento y mantenimiento de estos sistemas mediante análisis continuos y detallados [18].

La integración de inteligencia artificial (IA) y Machine Learning está transformando la planificación y optimización de la producción en la industria manufacturera. Herramientas como ProModel utilizan algoritmos de optimización basados en IA para mejorar la planificación y programación de la producción, mientras que AnyLogic AI incorpora capacidades de IA para mejorar la toma de decisiones en tiempo real y prever problemas antes de que ocurran [19]. Por otro lado, herramientas de análisis avanzado como Simio combinan simulación y programación para proporcionar

soluciones avanzadas de planificación y optimización de la producción [20]. Arena Simulation ofrece integración con herramientas de análisis avanzado como Seis Sigma, permitiendo la mejora continua basada en datos [21]. Estas tecnologías avanzadas están ayudando a las empresas a alcanzar niveles de eficiencia y calidad nunca vistos en sus procesos de producción.

Las tendencias emergentes en herramientas de simulación están redefiniendo la forma en que las empresas diseñan y optimizan sus procesos de producción. La integración con el internet de las cosas (IoT), ejemplificada por Microsoft Azure IoT Suite, permite la conexión de sistemas de simulación con dispositivos IoT, proporcionando datos en tiempo real para mejorar la precisión de las simulaciones [22]. Por otro lado, la realidad aumentada y la realidad virtual (AR/VR), como las ofrecidas por Visual Components, permiten la simulación y planificación de fábricas de manera inmersiva, posibilitando a los usuarios interactuar con modelos en entornos virtuales [23]. Además, la simulación en la nube, representada por CloudSim, permite realizar simulaciones complejas en entornos en la nube, reduciendo la necesidad de *hardware* local y facilitando la colaboración entre equipos distribuidos geográficamente [24]. Estas tendencias están revolucionando la forma en que las empresas visualizan, optimizan y colaboran en sus procesos de producción, llevando la eficiencia y la innovación a nuevos niveles.

Las aplicaciones en reingeniería de procesos de negocio (BPR) están siendo transformadas por herramientas especializadas que integran la simulación para mejorar y rediseñar los procesos empresariales. Ejemplos notables incluyen Bizagi, una herramienta de modelado y automatización de procesos que utiliza la simulación para identificar y eliminar ineficiencias en los procesos de negocio [25]. Del mismo modo, iGrafx facilita la simulación y análisis de procesos de negocio, proporcionando a las empresas las

herramientas necesarias para optimizar sus operaciones y adaptarse a un entorno empresarial en constante cambio [26]. Estas herramientas desempeñan un papel fundamental en la redefinición de los procesos empresariales, impulsando la eficiencia y la innovación en todas las áreas de la organización.

2.1.2 Análisis envolvente de datos

El análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) es una técnica de evaluación de eficiencia que se utiliza para medir el rendimiento relativo de un conjunto de unidades, como empresas, departamentos u organizaciones, que convierten múltiples entradas en múltiples salidas [27]. En lugar de utilizar medidas absolutas de eficiencia, DEA compara las unidades relativas entre sí, identificando aquellas que son más eficientes y estableciendo un «envolvente» alrededor de las unidades más eficientes para evaluar el rendimiento de las demás unidades en comparación con ellas [28].

En la actualidad, DEA se utiliza ampliamente en diversas industrias y disciplinas, incluyendo la economía, la gestión empresarial, la ingeniería, la salud y la educación, entre otras. Herramientas y *software* especializados están disponibles para llevar a cabo análisis DEA de manera eficiente y precisa, permitiendo a los investigadores y profesionales evaluar y mejorar la eficiencia de sus operaciones y procesos [29].

La tendencia en el análisis DEA se centra en su integración con otras técnicas de análisis avanzado, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, para mejorar su precisión y utilidad en un entorno empresarial en constante cambio. Además, se están desarrollando enfoques más avanzados para aplicar DEA en situaciones más complejas, como la evaluación de la eficiencia dinámica

a lo largo del tiempo y el análisis de la eficiencia en entornos de producción con múltiples productos y factores de producción [27].

2.1.3 Reingeniería de procesos o de negocio (BPR)

Es un enfoque metodológico que busca transformar radicalmente los procesos empresariales existentes para lograr mejoras significativas en términos de eficiencia, calidad, productividad y competitividad. A diferencia de los enfoques tradicionales de mejora continua, que se centran en hacer pequeños ajustes incrementales a los procesos existentes, la BPR implica una revisión completa y un rediseño radical de los procesos desde cero, con el objetivo de lograr cambios drásticos y mejoras sustanciales en el rendimiento empresarial [30].

En la actualidad, la reingeniería de procesos de negocio sigue siendo una práctica relevante y ampliamente utilizada en diversos sectores e industrias. Constantemente, las empresas están buscando formas de mejorar su eficiencia operativa y su capacidad de adaptación a un entorno empresarial en permanente cambio, y la BPR ofrece un enfoque poderoso para lograr estos objetivos [31]. Las herramientas y metodologías de BPR han evolucionado, integrando tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el análisis de datos, la automatización y la gestión del cambio organizacional para impulsar aún más la transformación empresarial [32].

En la práctica, el DEA puede utilizarse como una herramienta analítica en el contexto de la BPR para evaluar y optimizar la eficiencia de los procesos redefinidos. Por ejemplo, después de rediseñar un proceso empresarial como parte de un proyecto de BPR, se puede aplicar el DEA para medir la eficiencia relativa de las diferentes unidades operativas involucradas en ese proceso.

Esto permite identificar áreas de ineficiencia o subutilización de recursos que podrían no haber sido evidentes durante el proceso de reingeniería inicial.

También, puede proporcionar una métrica objetiva para evaluar el éxito de los esfuerzos de BPR al comparar el rendimiento antes y después de la adopción de los cambios en los procesos. Si el DEA muestra una mejora en la eficiencia relativa después aplicación de la reingeniería, esto proporciona una validación cuantitativa de los beneficios obtenidos por medio del proyecto de BPR [33].

La tendencia en la reingeniería de procesos de negocio se enfoca en la digitalización y la automatización de los procesos empresariales, aprovechando las tecnologías emergentes para optimizar la eficiencia y la agilidad operativa. Esto incluye el uso de herramientas de modelado y simulación avanzadas para visualizar y analizar los procesos empresariales, así como la adopción de sistemas de gestión empresarial integrados (ERP) y plataformas de automatización robótica de procesos (RPA) para mejorar la eficiencia y la productividad [34]. De la misma manera, la BPR se está adaptando para abordar los desafíos específicos de la economía digital como la personalización masiva, la colaboración en la nube y la gestión de grandes volúmenes de datos, lo que la convierte en una herramienta clave para las empresas que buscan mantenerse competitivas en el mercado actual [35].

2.2 Metodología

Durante la crisis provocada en las textilerías, Confecciones Henao optó por diversificar su producción y comenzar a fabricar camisetas. En respuesta a esta emergencia, se llevó a cabo una investigación, a lo largo de varios meses, con el objetivo princi-

pal de optimizar rápidamente la producción de camisetas. Las fases del estudio se ejecutaron de manera secuencial, garantizando que cada etapa se completara antes de pasar a la siguiente, lo que permitió una validación y ajuste continuo del *software* Factory 4.0.

Se adelantó un estudio de simulación para analizar y optimizar el proceso de producción de camisetas en la empresa seleccionada; este se ubica en un diseño experimental en el que se simulan diferentes escenarios de producción para evaluar la eficiencia y productividad, utilizando el *software* Factory 4.0.

La población de estudio fue el proceso de producción de camisetas en esa empresa. Se consideraron todos los elementos y variables involucrados en este, incluyendo maquinaria, personal, materias primas y métodos de producción.

Se escogieron diferentes momentos y situaciones representativos del proceso mencionado. Se tuvieron en cuenta varios turnos de trabajo y tipos de máquinas utilizadas, así como cambios en la carga de trabajo y la demanda de producción. Se buscó obtener una muestra diversa y representativa que permitiera una evaluación exhaustiva de la eficiencia del proceso en distintas condiciones.

La recolección de datos se realizó utilizando el *software* Factory 4.0, el cual permitió simular el proceso de producción y recopilar información detallada sobre la eficiencia y productividad en cada escenario simulado (véase la tabla 2.1). Se registraron datos relacionados con tiempos de producción, uso de recursos, calidad del producto y otros parámetros relevantes para la evaluación del proceso. Los datos recolectados fueron analizados utilizando técnicas como el análisis envolvente de datos (DEA) para identificar ineficiencias y áreas de mejora en el proceso de producción.

Tabla 2.1. Cumplimiento de las etapas metodológicas

Etapas	Fases	Verificación
Desarrollo y validación de Factory 4.0	Fase 1. Análisis y diseño	<p>Recopilación de datos: obtener información detallada sobre el proceso de producción de camisetas.</p> <p>Modelado de procesos: diseñar los procesos de producción.</p>
	Fase 2. Adopción y desarrollo	Desarrollo del <i>software</i> : programar Factory 4.0 con las funcionalidades definidas.
Evaluación de eficiencia y productividad con DEA	Fase 1. Definición de escenarios	Creación de escenarios: definir varios escenarios de producción con diferentes parámetros y condiciones
	Fase 2. Simulación y análisis	<p>Simulación de escenarios: ejecutar las simulaciones de cada escenario usando Factory 4.0.</p> <p>Aplicación de DEA: evaluar la eficiencia de cada escenario mediante análisis envolvente de datos.</p>
Identificación y resolución de ineficiencias	Fase 1. Análisis de resultados	Identificación de cuellos de botella: detectar áreas problemáticas en el proceso de producción a partir de los resultados de la simulación.
	Fase 2. Aplicación de mejoras	<p>Desarrollo de soluciones: proponer y simular mejoras para resolver ineficiencias.</p> <p>Monitoreo y ajuste: aplicar las soluciones en el proceso real y ajustar según los resultados obtenidos.</p>
Aplicación en reingeniería de procesos de negocio (BPR)	Fase 1. Generalización del modelo	Adaptabilidad: ajustar Factory 4.0 para su uso en diferentes industrias y procesos.
	Fase 2. Puesta en marcha en otras áreas	Aplicación en nuevos contextos: utilizar el modelo en otras industrias para rediseñar procesos.

Fuente: elaboración propia.

2.3 Resultados

2.3.1 Desarrollo y validación de Factory 4.0

Fase 1. Análisis y diseño

Se entrevistó a los operarios del proceso de camisetas para entender sus tareas y tiempos de producción. Igualmente, se observó el proceso de corte y confección para recoger datos adicionales sobre tiempos y eficiencia. Se revisaron los anteriores registros de producción para obtener tiempos de operación y tasas de producción. Se midieron directamente los tiempos de corte y confección con un cronómetro para asegurar la precisión.

Descripción del proceso (véase la tabla 2.2). La elaboración de camisetas comienza con el diseño y la selección de materiales, generalmente tela no tejida de polipropileno y capas de filtro, junto con bandas elásticas; esto se ve reflejado en el proceso de recepción. Las telas se cortan en la forma y tamaño adecuados y se ensamblan superponiendo las capas y sellándolas. Las bandas elásticas se fijan en los bordes. Algunas mascarillas pasan por un proceso de esterilización usando radiación UV. Cada lote se somete a un riguroso control de calidad para asegurar su eficacia, cumpliendo con las normativas pertinentes, elemento del proceso de producción. Finalmente, las mascarillas se empaquetan herméticamente y se distribuyen a los puntos de venta o directamente a los consumidores, teniendo en cuenta en algunos casos aspectos de sostenibilidad para reducir el impacto ambiental en el proceso de distribución. Se recopila la siguiente información del proceso.

Tabla 2.2. Modelo de procesos

Personaje	Cantidad de sitios	Recursos de los escenarios (humano y material)	Qué se mide	Cómo
Líder de producción y de calidad	Sección 1. Recepción	Recepción de la materia prima (trabajadores-cajas con materiales; llegan en carritos con la materia prima e insumos; se revisan dos condiciones calidad y cantidad; se almacena para ser usada por la sección 2).	La eficiencia de los proveedores, calidad del producto entregado, tiempo de entrega, cantidad entregada.	Órdenes de compra, remisión de entrada, tarjeta de datos defectuosos, lista de proveedores, calendario de entregas.
	Sección 2. Producción	31 trabajadores cosiendo camisetitas en máquinas de coser.	La eficiencia de las máquinas y la de los trabajadores.	Máquinas: cantidad daños mecánicos, tiempo de mantenimiento, tiempo de procesamiento- Tarjeta de datos Personal: cantidad de producto, tiempo en proceso, tiempos muertos, turno de trabajo - Tarjeta de datos
	Sección 3. Distribución	Distribución del producto (trabajadores-almacén-clientes-empaques).	La eficiencia de distribución, tiempo de entrega a los clientes, control calidad producto terminado (no conformes).	Órdenes de entrega, tarjeta de datos de producto no conforme.
Líder de producción y de calidad	Laboratorio	El personaje toma informes por cada una de las secciones y los trae a los computadores para medir el cómo por medio de un <i>software</i> o enlace, con el fin de realizar el diagnóstico o generar un plan de mejoramiento.		

Fuente: elaboración propia.

Producción actual de trabajadores:

Tiempo promedio para producir una unidad: 10 minutos.

Número de unidades producidas por hora: 6

Producción del proceso de cortado:

- Piezas cortadas por hora: 10
- Piezas necesarias para camisetas: 2
- Camisetas posibles de producir por hora según piezas cortadas: 5 unidades.

Producción del trabajador ágil:

- Unidades de camisetas producidas por hora: 7

La recopilación de datos reveló diferencias significativas en la eficiencia del trabajador actual y un trabajador más ágil en la producción de camisetas. El trabajador actual produce una media de una camiseta cada 10 minutos, lo que resulta en una tasa de producción de 6 unidades por hora. Por otro lado, el trabajador ágil tiene una capacidad de producción de 7 unidades por hora. Estos resultados se produjeron debido a las limitaciones físicas y de agilidad del trabajador actual, quien, siendo un adulto mayor, no puede mantener una tasa de producción más alta. Además, el cortador produce 10 piezas por hora, suficiente para solo 5 camisetas, lo que genera un desbalance en la línea de producción.

Los resultados son congruentes con las expectativas iniciales y la teoría de manufactura. La diferencia en la producción entre los dos trabajadores se alinea con los principios básicos de eficiencia operativa y capacidad humana. Es lógico que un trabajador más ágil, con mayor destreza y rapidez, pueda superar la tasa de producción de un trabajador menos ágil. Además, la limitación impuesta por el cortador es un factor crítico que afecta la producción general. La producción del cortador, al proporcionar solo 10

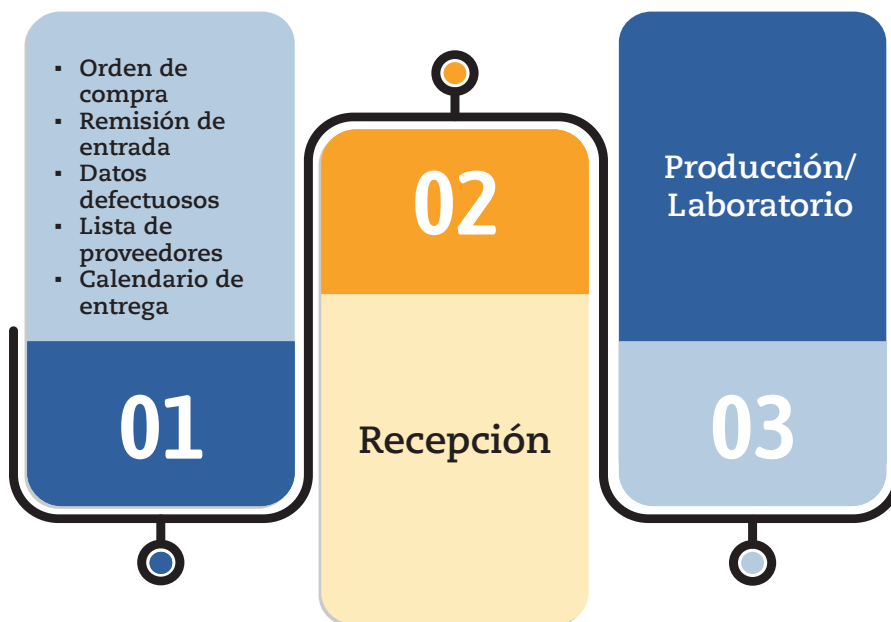
piezas por hora, restringe el flujo de materiales a la estación de confección, creando un cuello de botella evidente en el sistema.

Los resultados subrayan la importancia de equilibrar cada etapa del proceso de producción para evitar desbalances que puedan reducir la eficiencia global. La simulación de diferentes escenarios productivos utilizando Factory 4.0 permitirá visualizar y cuantificar estos impactos antes de efectuar cambios en la vida real. Esto ayuda a tomar decisiones informadas y reduce riesgos asociados con la reestructuración de procesos productivos.

Fase 2. Puesta en marcha y pruebas

Inicialmente, para el desarrollo del *software* Factory 4.0, se analizan los datos de entrada que se requieren para cada una de las etapas del proceso. En el proceso de recepción se toman los datos que se observan en la figura 2.1; estos se establecerán en una tabla de información que tomará el *software* para el análisis.

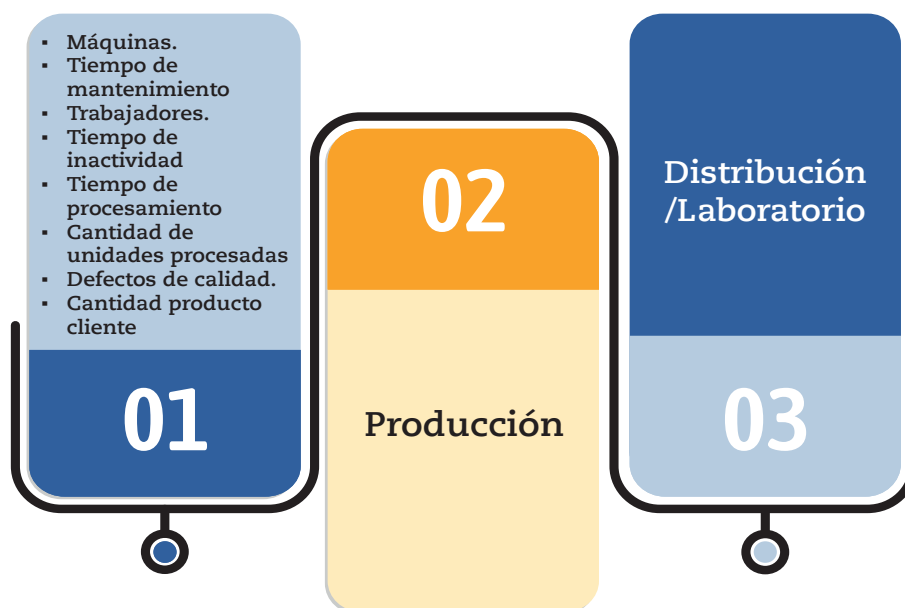
Figura 2.1. Proceso de recepción de datos



Fuente: elaboración propia.

La figura 2.2 muestra una relación secuencial; en ella, las entradas (máquinas, tiempos, trabajadores, entre otros) afectan la producción y esta afecta la distribución. La clave del análisis está en entender cómo cada factor en el bloque 1 impacta la producción y, en última instancia, la distribución y la satisfacción del cliente. La integración y el equilibrio de estos factores son esenciales para optimizar el proceso de producción. El diagrama es usado en el *software* Factory 4.0 como una guía para identificar áreas de mejora. Por ejemplo, reducir los tiempos de inactividad y defectos de calidad puede aumentar la cantidad de unidades procesadas y mejorar el rendimiento general del sistema de producción.

Figura 2.2. Relación secuencial

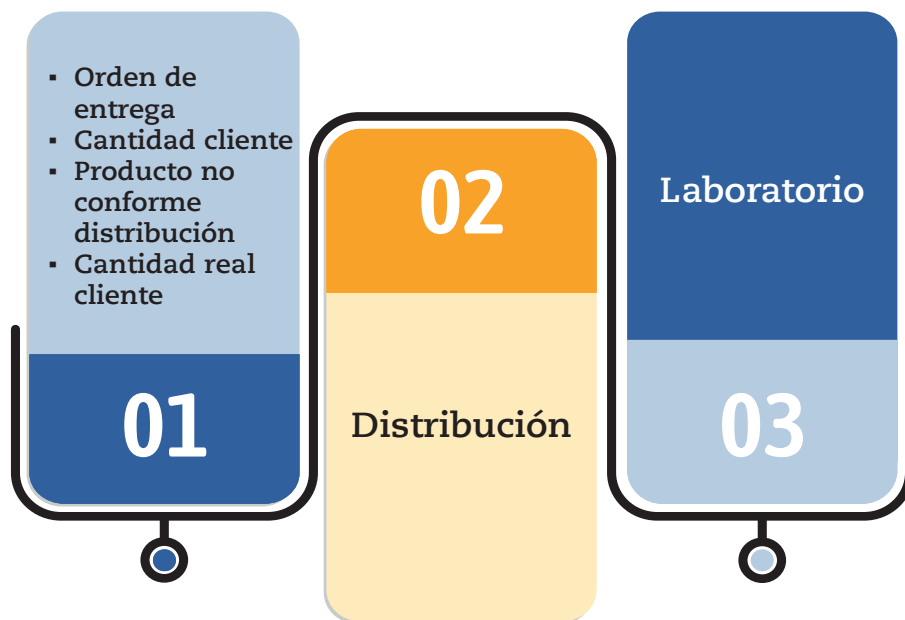


Fuente: elaboración propia.

La figura 2.3 representa la etapa de distribución del proceso de producción de camisetas en el *software* Factory 4.0. En la sección de distribución, se consideran aspectos cruciales como el orden de entrega, la cantidad solicitada por el cliente, la identificación de productos no conformes y la cantidad real entregada al cliente. Estos factores son esenciales para asegurar que la distribución

sea eficiente y que los clientes reciban productos de alta calidad. Posteriormente, el proceso pasa al laboratorio, donde se realizan controles de calidad adicionales para verificar que los productos cumplan con los estándares requeridos. Este enfoque permite a Factory 4.0 optimizar tanto la distribución como el aseguramiento de la calidad, mejorando así la satisfacción del cliente y la eficiencia del proceso productivo.

Figura 2.3. Etapa de distribución del proceso de producción



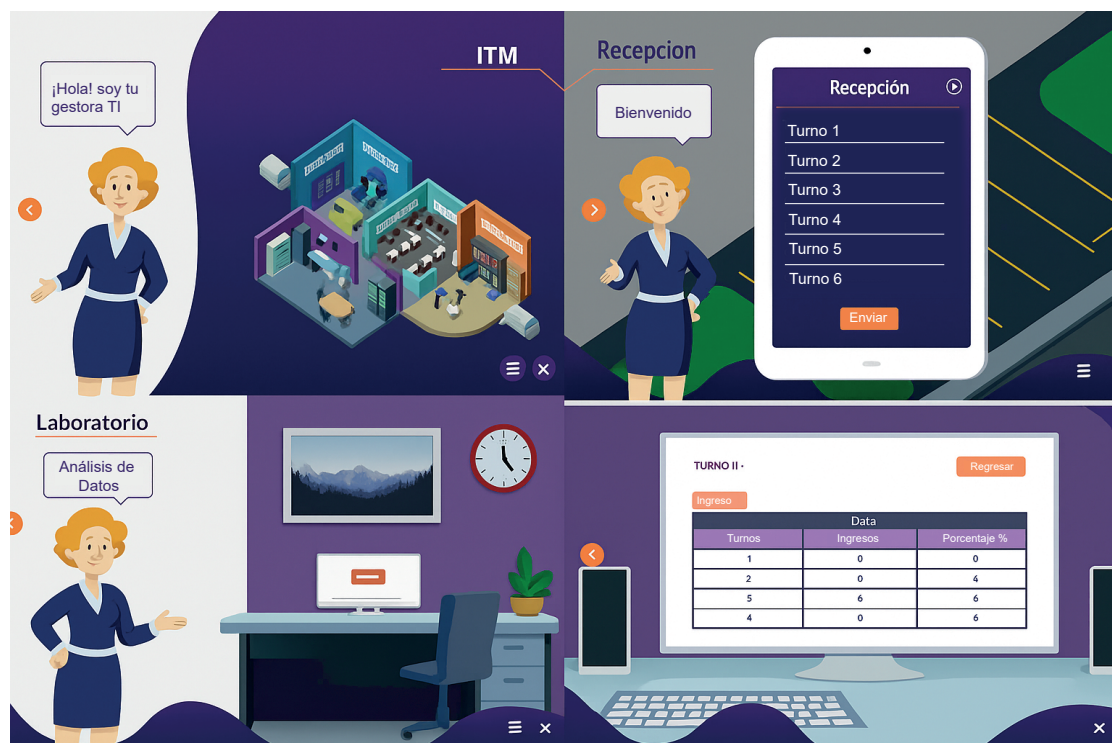
Fuente: elaboración propia.

La herramienta presenta un micromundo que simula un entorno empresarial con cuatro áreas principales: Recepción, Producción, Distribución y Laboratorio. Cada una tiene sus propios procesos, como se muestra en la figura 2.4. Estos procesos operan en tres turnos y, según la selección realizada, se recopila información como la mostrada en las figuras anteriores. En el área de laboratorio, se procesa la información para impulsar la eficiencia utilizando modelos matemáticos de análisis de datos. Los líderes pueden valerse de estos resultados para identificar qué procesos

y turnos son los más eficientes, lo que les permite tomar decisiones clave para mejorar las actividades relacionadas.

Para facilitar este proceso, un avatar acompaña a los líderes proporcionando orientación sobre las selecciones necesarias o información crucial para el proceso.

Figura 2.4. Áreas de trabajo y procesos



Fuente: elaboración propia.

La aplicación de Factory 4.0 en Confecciones Henao permitió simular el proceso de producción de camisetas, desde la recepción hasta la distribución. Al hacer clic en el área de Recepción, se accede a datos detallados que se consideran variables dentro de los escenarios modelados. Esta información es trasladada al laboratorio para un estudio exhaustivo mediante el análisis envolvente de datos (DEA). Los resultados obtenidos mostraron que ciertos escenarios eran más eficientes en términos de productividad y

calidad. Estos resultados son congruentes con las expectativas iniciales, ya que reflejan las variaciones en la eficiencia causadas por diferentes configuraciones de recursos y condiciones operativas. Los hallazgos indican que la simulación y el uso del DEA permiten identificar áreas críticas y optimizar el proceso de producción, validando así la eficacia de Factory 4.0 como herramienta para mejorar la gestión de la producción en situaciones de alta demanda y cambios rápidos en la operación.

2.4 Evaluación de eficiencia y productividad con DEA

Fase 1. Definición de escenarios

Los datos que se tomaron en cada una de las fases del proceso caracterizados como entradas y salidas se evidencian en las tablas. Los modelos que se analizan en cada fase del proceso y que son simulados en el *software* Factory 4.0 son los modelos matemáticos CCR-I, CCR-O, BCC-I, BCC-O.

Encabezados Recepción / Modelos CCR-I, CCR-O, BCC-I, BCC-O
Carro (DMU)
I. Orden de compra
I. Remisión de entrada
O. Tarjeta datos defectuosos
O. Datos defectuosos
O. Lista de proveedores
O. Calendario de entrega (días)
Encabezados Producción / Modelos CCR-I, CCR-O, BCC-I, BCC-O
Máquina, persona o trabajo (DMU)
I. Tiempo de mantenimiento
I. Trabajador
I. Tiempos muertos

Continúa...

I. Tiempo de procesamiento
O. Cantidad de unidades procesadas
O. Defectos calidad
O. Cantidad producto cliente
Encabezados Distribución / Modelos CCR-I, CCR-O, BCC-I, BCC-O
Carro (DMU)
I. Orden de entrega cliente
I. Cantidad cliente
O. Producto no conforme distribución
O. Cantidad real cliente

Los datos recopilados en cada fase del proceso de producción de camisetas, caracterizados como entradas y salidas, se utilizaron para evaluar diferentes modelos mediante el *software* Factory 4.0. Los modelos matemáticos analizados fueron CCR-I, CCR-O, BCC-I y BCC-O. Los resultados obtenidos mostraron variaciones significativas en la eficiencia, dependiendo del modelo y escenario aplicados. Esto es congruente con la teoría subyacente de cada modelo DEA, en la que CCR asume rendimientos constantes a escala y BCC permite rendimientos variables. La salida de estos análisis indica que algunos escenarios optimizan mejor los recursos y la productividad, dependiendo de las condiciones operativas específicas. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar el modelo adecuado según las características del proceso y el entorno de producción, demostrando así la eficacia de Factory 4.0 para identificar y optimizar la eficiencia en la producción de camisetas.

Fase 2. Simulación y análisis

Durante la simulación de escenarios usando Factory 4.0, como se observa en la figura 2.5, se analizó específicamente el comportamiento de la producción en el turno 1 en cinco puestos de trabajo. Inicialmente, se seleccionó el turno y se recopilaron los datos de cada puesto. El esquema general permitió identificar claramen-

te los puestos de trabajo involucrados y el análisis de eficiencia, realizado por el software, mostró cómo cada puesto contribuyó al rendimiento global.

Figura 2.5. Paso a paso generación de datos y procesamiento en el laboratorio con DEA



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos revelaron diferencias en la eficiencia de los puestos de trabajo, lo cual es consistente con la variabilidad esperada en un entorno de producción real. Estos hallazgos indican que algunos puestos operaban de manera más eficiente que otros, sugiriendo posibles cuellos de botella o áreas con oportunidades de mejora. La congruencia de los resultados con las condiciones observadas durante el turno subraya la precisión de Factory 4.0 en la simulación y evaluación de escenarios, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y la optimización del proceso productivo.

El modelo de análisis envolvente de datos que utilizamos en esta fase de simulación fue el CCR-I. El modelo básico del DEA se conoce como el modelo CCR (Charnes, Cooper y Rhodes). Este se utiliza para determinar la eficiencia relativa de las unidades en función de sus *inputs* y *outputs*.

2.4.1 Formulación del problema

Supongamos que tenemos n unidades, que en nuestro caso son 5 puestos de trabajo en el área de Producción que posee los procesos de corte y confección de las camisetas, los cuales deben cumplir con los requisitos de los clientes.

Cada unidad tiene m *inputs*, que son I. Tiempo de mantenimiento, I. Trabajador, I. Tiempos muertos y s *outputs* que son O. Cantidad de unidades procesadas, O. Defectos calidad, O. Cantidad producto cliente.

El modelo matemático programado en el software Factory 4.0 es el siguiente:

Función objetivo

$$\min \theta_0 = \theta$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{r0} \quad r = 1, 2, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Donde:

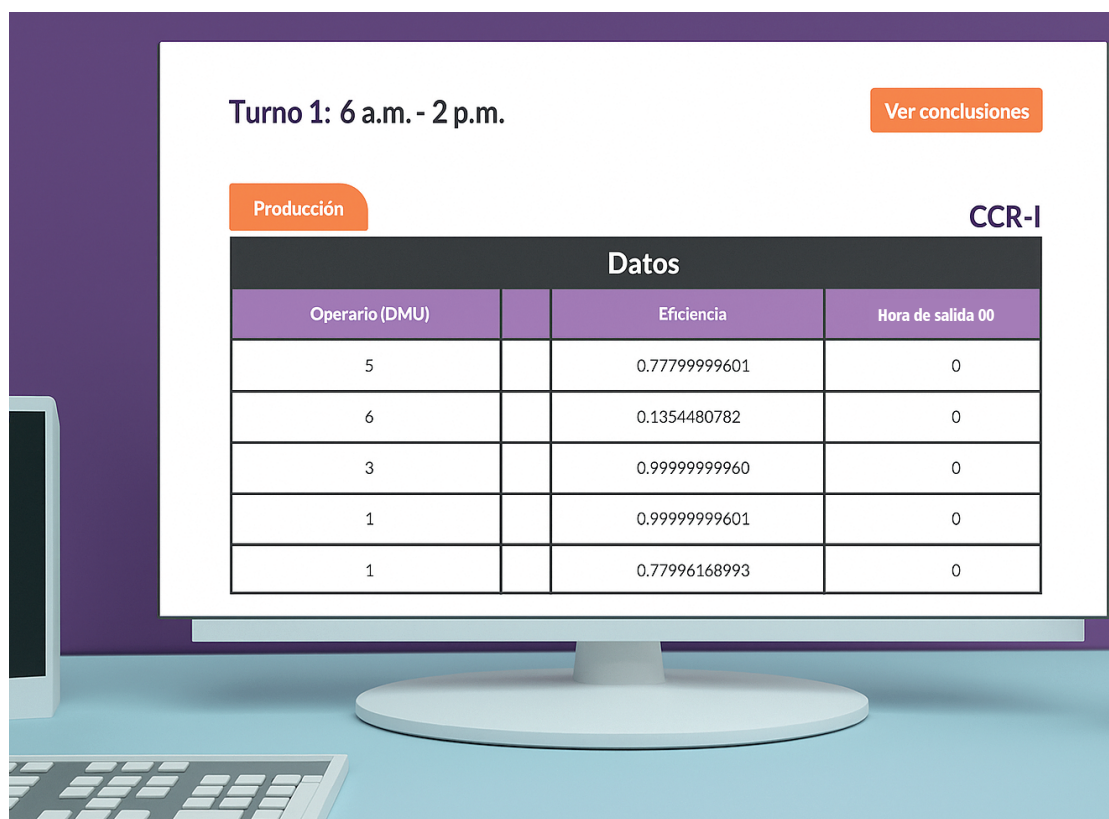
θ es la eficiencia

x_{ij} son las variables de entrada

y_{rj} son las variables de salida

El resultado se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6. Resultados del modelo por medio de Factory 4.0



Fuente: elaboración propia.

Durante la simulación del turno 1 en el proceso de producción usando Factory 4.0, se observó que los trabajadores 1 y 3 tienen una eficiencia del 78 %, mientras que el trabajador 4 muestra una eficiencia significativamente menor del 53 %. Por otro lado, los trabajadores 2 y 5 se destacaron como los más eficientes. Estos resultados surgieron probablemente debido a diferencias en

habilidades, experiencia o condiciones de trabajo específicas en cada puesto. La congruencia de estos datos con las observaciones del entorno de producción sugiere que las variaciones en eficiencia son reales y reflejan las capacidades y limitaciones individuales de los trabajadores. Estos resultados indican áreas específicas donde se puede enfocar la capacitación o la reestructuración del flujo de trabajo para equilibrar la carga de este y mejorar la eficiencia general del proceso productivo.

2.4.2 Identificación y resolución de ineficiencias

Fase 1. Análisis de resultados

Se identifica que el cuello de botella de la simulación se encuentra en el puesto del trabajador 4, cuya baja eficiencia del 53 % ralentiza el flujo de producción. Abordar este cuello de botella, ya sea mediante mejoras en la capacitación, ajustes en la distribución del trabajo, o actualizaciones en el equipo, será crucial para optimizar el rendimiento general del sistema.

Fase 2. Adopción de mejoras

Para mejorar la eficiencia del 53 % del trabajador 4 en relación con la simulación de Factory 4.0, se adoptaron medidas específicas. Una de ellas fue la optimización de la asignación de tareas en la simulación. Utilizando Factory 4.0, se reasignaron y balancearon las tareas entre los trabajadores. Al simular diferentes configuraciones de asignación de tareas, se encontró la distribución óptima que maximizó la eficiencia del trabajador 4, equilibrando su carga de trabajo con la de otros empleados para mejorar el flujo general del proceso. Otra medida fue la simulación de entrenamiento y capacitación. Factory 4.0 incluyó módulos de simulación de entrenamiento que permitieron al trabajador 4 mejorar sus habilidades. Mediante la simulación

del impacto de la capacitación en la eficiencia del trabajador, se identificaron las áreas más efectivas de mejora, proporcionando un enfoque dirigido para el desarrollo de habilidades.

El rediseño del puesto de trabajo mediante simulación fue otra estrategia clave. Utilizando esta herramienta, se reorganizó el entorno laboral del trabajador 4, modelando diferentes configuraciones de espacio, flujo de materiales y disposición de herramientas. Esto ayudó a reducir los tiempos muertos y los movimientos innecesarios, optimizando así el desempeño de ese trabajador.

La incorporación de herramientas automatizadas o asistidas por tecnología también fue simulada para evaluar su impacto en la eficiencia del trabajador 4. Al hacerlo, se determinó cómo podían reducir el esfuerzo manual y aumentar la precisión y la velocidad del trabajo, mejorando significativamente la eficiencia.

La evaluación de diferentes horarios y turnos fue otra medida útil, como se observa en la figura 2.7. Factory 4.0 simuló diferentes horarios y turnos para el trabajador 4, evaluando si los cambios en la programación podían mejorar su eficiencia al alinear mejor sus tareas con los períodos de mayor productividad personal. Establecer un sistema de *feedback* en tiempo real en Factory 4.0 proporcionó recomendaciones inmediatas basadas en el desempeño del trabajador 4 durante la simulación. Este *feedback* ayudó a ajustar comportamientos y a mejorar la eficiencia en tiempo real, ofreciendo una herramienta poderosa para la mejora continua.

Finalmente, se estableció un ciclo de mejora continua basado en simulación. Utilizando Factory 4.0, se realizaron simulaciones iterativas para probar diferentes mejoras y ajustes, evaluando continuamente los resultados para identificar las estrategias más

efectivas. Este enfoque permitió una optimización constante del rendimiento del trabajador 4 y del proceso productivo en general.

Figura 2.7. Pantalla donde se muestran los resultados eficiencia del modelo CCR-I



Fuente: elaboración propia.

A pesar de que la simulación mejoró significativamente, los resultados mostraron que el puesto de trabajo 4 alcanzó una eficiencia del 100 %, lo cual indicó que las medidas adoptadas fueron efectivas en optimizar su desempeño. Sin embargo, el puesto de trabajo 3 aún presentó un 75 % de eficiencia, lo que sugería que persistían problemas específicos en esa área. Los resultados fueron congruentes con las expectativas iniciales de que no todos los puestos alcanzarían la misma eficiencia al mismo ritmo, subrayando la importancia de un análisis y ajuste continuos. Estos resultados indicaron la necesidad de realizar un análisis más profundo en el puesto de trabajo 3 para identificar y abordar los

obstáculos que impedían alcanzar una eficiencia óptima, asegurando así una mejora integral y sostenible en el proceso de producción.

2.4.3 Identificación y resolución de ineficiencias

Fase 1. Generalización del modelo

La fase inicial del proceso de reingeniería de procesos de negocio (BPR) implicó la generalización del modelo de Factory 4.0, diseñado para adaptarse a cualquier tipo de proceso que involucrara recepción, producción y distribución de productos. Este modelo genérico se desarrolló con la flexibilidad necesaria para aplicarse a una amplia gama de industrias y contextos empresariales. Los fundamentos necesarios para una adopción exitosa de BPR incluyeron la comprensión detallada de los procesos existentes, la identificación clara de los objetivos de mejora, la capacitación adecuada del personal en el uso de la herramienta y la disposición para adaptar el modelo a las necesidades específicas de cada organización. Mediante la generalización del modelo, se establecieron las bases necesarias para la puesta en marcha exitosa del BPR, permitiendo que las organizaciones puedan aprovechar al máximo las capacidades de Factory 4.0 para mejorar su competitividad y eficacia operativa.

Fase 2. Adopción en otras áreas

En esta fase, se ha decidido emplear el modelo en diversas industrias, con el fin de rediseñar procesos y mejorar la eficiencia operativa en distintos entornos empresariales. Esta decisión se fundamentó en la premisa de que las prácticas exitosas pueden ser adaptadas y aplicadas en diferentes sectores, siempre y cuando se realicen las modificaciones necesarias para abordar

las particularidades de cada industria. La estrategia se basó en un análisis exhaustivo de las necesidades y desafíos específicos de cada sector, con la idea de aprovechar el potencial del modelo para generar mejoras significativas en los procesos empresariales. Cada sector enfrenta una serie única de necesidades y desafíos que deben abordarse para mejorar su eficiencia operativa y la competitividad en el mercado. Estas necesidades pueden incluir cumplimiento regulatorio, adopción de tecnologías emergentes, competencia en el mercado, gestión de recursos y cadena de suministro, así como demandas cambiantes de los clientes. Por ejemplo, la industria farmacéutica puede requerir cumplimiento riguroso con regulaciones, mientras que la industria de la tecnología puede necesitar adoptar nuevas soluciones digitales para mantenerse al día con la innovación. Entender estas diferencias es crucial para adaptar estrategias y procesos empresariales de manera efectiva a cada sector específico.

La puesta en práctica del modelo en otras industrias fue el resultado de este análisis detallado, que identificó oportunidades para aplicar las mejores prácticas y soluciones innovadoras en diferentes contextos. Esta estrategia fue congruente con el objetivo general de mejorar la eficiencia operativa y optimizar los procesos empresariales, ya que se basó en la premisa de que las prácticas exitosas pueden ser transferibles entre sectores. Los resultados indicaron que el modelo era altamente adaptable y efectivo para mejorar la eficiencia operativa en una variedad de entornos empresariales. Su capacidad para generar mejoras significativas en los procesos empresariales en diferentes industrias subrayó su versatilidad y su valor como herramienta para impulsar la innovación y la excelencia operativa. En conjunto, estos resultados resaltaron la importancia de buscar oportunidades para aplicar soluciones innovadoras y mejores prácticas en diferentes

contextos empresariales, con el objetivo de optimizar la eficiencia operativa y mantener la competitividad en el mercado.

2.5 Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman el cumplimiento del objetivo general de mejorar la competitividad y eficacia operativa mediante la aplicación de Factory 4.0 en el proceso de producción de camisetas y su expansión a otras industrias. La eficiencia operativa del proceso de producción de camisetas se incrementó significativamente mediante la identificación de áreas de mejora y la aplicación de medidas específicas para abordarlas. Además, la adaptación del modelo a diversas industrias ha demostrado ser efectiva para optimizar los procesos empresariales y generar mejoras significativas en la eficiencia operativa en diferentes contextos. Estos resultados respaldan la efectividad de Factory 4.0 como herramienta para impulsar la innovación y la excelencia operativa en un entorno empresarial en constante cambio.

Los principales resultados incluyen la identificación de áreas de mejora específicas en el proceso de producción de camisetas como la baja eficiencia del trabajador 4 y el desequilibrio en la línea de producción debido al rendimiento del cortador. Además, se observó que la adopción de Factory 4.0 permitió una optimización efectiva de los procesos empresariales en diferentes industrias, lo que se tradujo en mejoras significativas en la eficiencia operativa y la competitividad. La adaptabilidad y la versatilidad del modelo se destacaron como elementos clave para su éxito en distintos entornos empresariales.

Los resultados obtenidos proporcionan varios aportes y beneficios significativos. En primer lugar, la identificación de áreas

de mejora específicas en el proceso de producción de camisas permite establecer acciones correctivas dirigidas a aumentar la eficiencia y la productividad. Además, la aplicación exitosa de Factory 4.0 en diversas industrias destaca su capacidad para adaptarse y generar mejoras en una variedad de contextos empresariales, lo que demuestra su versatilidad y utilidad práctica. Estos resultados también subrayan la importancia de utilizar herramientas innovadoras como Factory 4.0 para mejorar la eficiencia operativa y mantener la competitividad en el mercado.

Para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, se recomienda profundizar en el análisis de las áreas identificadas como cuellos de botella o de baja eficiencia, como el puesto de trabajo 4 en el proceso de producción de camisas. Esto podría implicar estudios adicionales para comprender mejor las causas subyacentes de las ineficiencias y desarrollar estrategias específicas de mejora. Asimismo, se sugiere explorar la posibilidad de integrar tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial o el aprendizaje automático, en el modelo Factory 4.0 para aumentar su capacidad predictiva y de optimización. Además, sería beneficioso realizar un seguimiento continuo del desempeño del modelo en diferentes contextos industriales y hacer ajustes, según sea necesario, para garantizar su efectividad a largo plazo. Estas recomendaciones pueden contribuir a fortalecer aún más la capacidad de Factory 4.0 para mejorar la eficiencia operativa y promover la innovación en diversas áreas de la producción industrial.

Los resultados obtenidos permiten realizar un diagnóstico inicial que muestra el panorama de la empresa; de igual forma, generan un plan de mejora en el que se intervienen de forma significativa los procesos organizacionales, validando y generando valor para alcanzar mayor competitividad en el mercado y el desarrollo de sus bienes o servicios.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses de índoles comercial, contractual, o relacionados con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

La presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno, la sociedad o el medioambiente.

Referencias

- [1] L. Zhang, L. Zhou, L. Ren, and Y. Laili, "Modeling and simulation in intelligent manufacturing," *Comput. Ind.*, vol. 112, p. 103123, 2019.
- [2] D. Mourtzis, "Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 7, pp. 1927–1949, 2020.
- [3] A. Rosova, M. Behun, S. Khouri, M. Cehlar, V. Ferencz, and M. Sofranko, "Case study: the simulation modeling to improve the efficiency and performance of production process," *Wireless Netw.*, vol. 28, no. 2, pp. 863–872, 2022.
- [4] G. Guizzi, D. Falcone, and F. De Felice, "An integrated and parametric simulation model to improve production and maintenance processes: Towards a digital Factory performance," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, p. 106052, 2019.
- [5] L. S. Valamede and A. C. S. Akkari, "Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies," *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, vol. 5, no. 5, p. 851, 2020.
- [6] N. Habibifar, M. Hamid, M. Bastan, and A. T. Azar, "Performance optimization of a pharmaceutical production line by integrated simulation and data envelopment analysis," *Int. J. Simul. Process Model.*, vol. 14, no. 4, pp. 360–376, 2019.
- [7] D. Khezrimotlagh, J. Zhu, W. D. Cook, and M. Toloo, "Data envelopment analysis and big data," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 274, no. 3, pp. 1047–1054, 2019.
- [8] R. Choudhary and N. Riaz, "A business process re-engineering approach to transform business process simulation to BPMN model," *PLoS One*, vol. 18, no. 3, p. e0277217, 2023.
- [9] A. S. Ullah, "Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0," *Adv. Eng. Inform.*, vol. 39, pp. 1–13, 2019.
- [10] D. J. van der Zee, "Model simplification in manufacturing simulation—Review and framework," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, pp. 1056–1067, 2019.

- [11] C. Li, Y. Chen, and Y. Shang, "A review of industrial big data for decision making in intelligent manufacturing," *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 29, p. 101021, 2022.
- [12] M. A. Pereira, D. C. Ferreira, J. R. Figueira, and R. C. Marques, "Measuring the efficiency of the Portuguese public hospitals: A value modelled network data envelopment analysis with simulation," *Expert Syst. Appl.*, vol. 181, p. 115169, 2021.
- [13] J. Bokrantz, A. Skoogh, D. Lämkuil, A. Hanna, and T. Perera, "Data quality problems in discrete event simulation of manufacturing operations," *Simulation*, vol. 94, no. 11, pp. 1009–1025, 2018.
- [14] B. Özcan and E. Yıldırak, "A simulation study on a production system," *Aksaray Univ. J. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 172–186, 2020.
- [15] P. T. Roundy, M. Bradshaw, and B. K. Brockman, "The emergence of entrepreneurial ecosystems: A complex adaptive systems approach," *J. Bus. Res.*, vol. 86, pp. 1–10, 2018.
- [16] M. A. Seyyedrezaei and M. Alvandi, "Improving the manufacturing process using Industry 4.0 tool: a simulation-based approach," *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 14, no. 1, pp. 52–83, 2023.
- [17] A. Florescu and S. A. Barabas, "Modeling and simulation of a flexible manufacturing system—A basic component of industry 4.0," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 22, p. 8300, 2020.
- [18] Q. Qi et al., "Enabling technologies and tools for digital twin," *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 3–21, 2021.
- [19] R. Cioffi, M. Travaglioni, G. Piscitelli, A. Petrillo, and F. De Felice, "Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: Progress, trends, and directions," *Sustainability*, vol. 12, no. 2, p. 492, 2020.
- [20] M. Dehghanimohammadabadi and T. K. Keyser, "Intelligent simulation: Integration of SIMIO and MATLAB to deploy decision support systems to simulation environment," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 71, pp. 45–60, 2017.
- [21] A. A. Abdallah, "Simulated Six Sigma: A multi response optimization," *Qual. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 583–594, 2020.
- [22] G. J. Fortino, A. Guerrieri, P. Pace, C. Savaglio, and G. Spezzano, "IoT platforms and security: An analysis of the leading industrial/commercial solutions," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2196, 2022.
- [23] M. Farshid, J. Paschen, T. Eriksson, and J. Kietzmann, "Go boldly!: Explore augmented reality (AR), virtual reality (VR), and mixed reality (MR) for business," *Bus. Horiz.*, vol. 61, no. 5, pp. 657–663, 2018.

- [24] M. O. Ahmad and R. Z. Khan, "Cloud computing modeling and simulation using CloudSim environment," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 2, 2019.
- [25] A. A. N. Nurdin, A. N. Pristanti, and N. Samantha, "Business process modeling at steak restaurant using business process model and notation," *J. Soft Comput. Explor.*, vol. 3, no. 2, pp. 85–92, 2022.
- [26] F. X. A. N. S. Putro and M. Dachyar, "Hospital surgical services design improvement using business process re-engineering and relational database approaches," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 7, pp. 3588–3596, 2020.
- [27] F. B. Mariz, M. R. Almeida, and D. Aloise, "A review of dynamic data envelopment analysis: state of the art and applications," *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 469–505, 2018.
- [28] K. Rashidi and K. Cullinane, "Evaluating the sustainability of national logistics performance using Data Envelopment Analysis," *Transp. Policy*, vol. 74, pp. 35–46, 2019.
- [29] R. Mahmoudi, A. Emrouznejad, S. N. Shetab-Boushehri, and S. R. Hejazi, "The origins, development and future directions of data envelopment analysis approach in transportation systems," *Socio-Econ. Plan. Sci.*, vol. 69, p. 100672, 2020.
- [30] N. K. Vishvakarma, R. R. K. Sharma, and Kumar, "An empirical analysis of impact of organizational strategies on critical success factors of business process reengineering," *Glob. J. Flex. Syst. Manag.*, vol. 22, pp. 55–73, 2021.
- [31] Z. Zaini and A. Saad, "Business process reengineering as the current best methodology for improving the business process," *J. ICT Educ.*, vol. 6, pp. 66–85, 2019.
- [32] V. Kyfyak and Y. Lopatynskiy, "Methodical approaches to business processes reengineering at modern enterprises," *Balt. J. Econ. Stud.*, vol. 4, no. 4, pp. 151–158, 2018.
- [33] V. W. Elapatha and S. N. Jehan, "An analysis of the implementation of business process re-engineering in public services," *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 6, no. 4, p. 114, 2020.
- [34] A. Sujová, L. Simanová, and K. Marcinekóvá, "Reengineering of production processes and its impact on the financial situation and business performance of the company," *Eng. Manag. Prod. Serv.*, vol. 11, no. 3, pp. 106–116, 2019.
- [35] O. Kuzmin, V. Ovcharuk, and V. Zhezhukha, "Economic evaluation of administration systems in the context of management business processes reengineering," *Econ. Entrep. Manag.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, 2019.



Capítulo 03

Selección de técnicas básicas de *Lean Manufacturing* en pymes del sector servicios de Medellín

Selection of Basic Lean Manufacturing Techniques in SME in the Service Sector of Medellín

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.03>

Diana María Montoya-Quintero ¹

Olga Lucía Larrea-Serna ²

Lilyana Jaramillo-Ramírez ³

¹ Docente investigadora, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID 0000-0003-0761-4067, correo electrónico dianamontoya@itm.edu.co

² Docente investigadora, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID 0000-0003-3261-1247, correo electrónico olgalarrea@itm.edu.co

³ Docente, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-2348-6889, correo electrónico lilyanajaramillo@itm.edu.co

Resumen. Este capítulo presenta la aplicación de herramientas *lean* a través de las empresas de servicio y la selección de las técnicas *lean* más útiles para desarrollar un modelo para una empresa innovadora e inteligente, donde la iniciativa en el proceso es preparar a las empresas de este sector para la industria 4.0. Después de varias visitas a empresas de Medellín, catalogadas como pequeñas y medianas empresas, se ha observado que no se ha investigado la selección y aplicación de técnicas y herramientas *lean* adecuadas en las empresas de servicios de la ciudad. El objetivo es comprender cómo las empresas del sector terciario de Medellín utilizan las técnicas y cuáles son las más útiles. Los análisis se han realizado a partir de entrevistas y cuestionarios. Con base en la respuesta al cuestionario se seleccionan dos técnicas básicas *lean* que representan herramientas para el desarrollo de un modelo de sistema de producción en relación con la industria 4.0 en empresas de servicio y se analiza la evolución de las empresas en relación con la adopción de estas en los procesos empresariales y se evalúa la productividad usando técnicas de análisis de eficiencia.

Palabras clave: análisis envolvente de datos, empresas de servicios, industria 4.0, *Lean Manufacturing*, pequeñas y medianas empresas.

Introducción



Recientemente, se han realizado numerosas investigaciones relacionadas con las técnicas de Lean Manufacturing. Sin embargo, se ha informado muy poco sobre la aplicación y selección de la herramienta básica *lean* en el sector servicio de la ciudad de Medellín, Colombia. Originario de Japón, específicamente en Toyota, durante la década de 1960, el paradigma de producción conocido como Lean Manufacturing emergió, fundamentado en la reducción o eliminación de desperdicios y actividades que no agregan valor al proceso de fabricación. Esta filosofía de gestión, basada en el sistema de producción de Toyota (TPS) [1], se ha consolidado como un pilar para la eficiencia y la competitividad empresarial en un entorno globalizado.

La economía global, caracterizada por su dinamismo y constante evolución, demanda que las empresas alcancen niveles de productividad óptimos para asegurar su permanencia en el mercado. En este contexto, los tratados de libre comercio, espe-

cialmente en países en desarrollo, intensifican la presión sobre las pequeñas y medianas empresas (pymes) para fortalecer su competitividad. Sin embargo, un estudio reciente realizado por la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia en 2023 reveló que el 80 % de las dificultades que enfrentan las pymes en la región se atribuyen a la falta de competitividad [2].

De acuerdo con el estudio de la figura 3.1, se refleja la necesidad de intervenir con herramientas de productividad a este sector de empresas medianas y pequeñas, para que sean más competentes en el mercado en el que se desenvuelven. A lo largo de los años, Antioquia ha pasado por diversos sectores económicos: en el siglo XIX, su principal actividad económica era la minería; desde mediados del siglo XIX hasta inicios del siglo XX el crecimiento de Antioquia se dio con el desarrollo del sector industrial con la Casa de la Moneda, la ferrería de Antioquia y la red ferroviaria [2]. En los sectores industrial y productivo de Antioquia se vio en la necesidad de enfocarse en el tercer sector económico, el sector servicios, debido a las condiciones geográficas del territorio y a los costos generados para distribuir sus productos manufactureros y agrícolas a los diferentes mercados.

La tendencia de los municipios antioqueños, principalmente Medellín, se enfoca en los servicios. De acuerdo con estudios de la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia [3], se puede concluir que un 78.9 % de la economía antioqueña está dentro del sector terciario, contra un 21.1 % dentro del sector primario, la agricultura y el sector secundario, transformación.

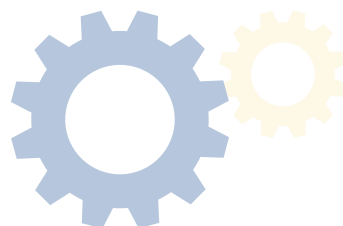
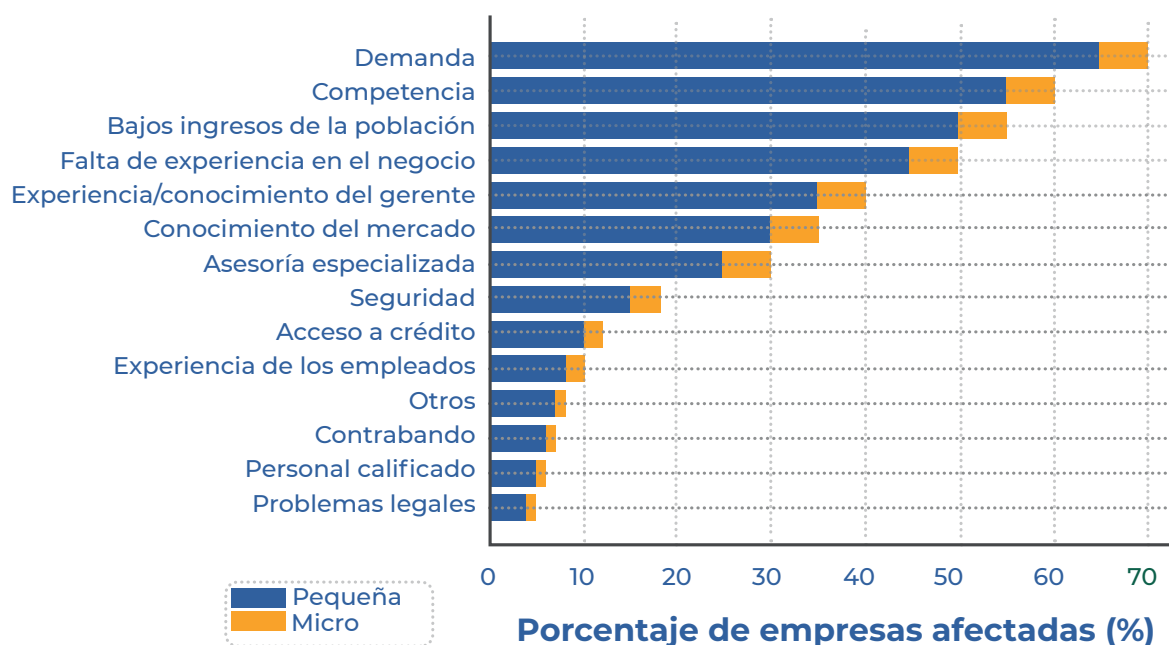


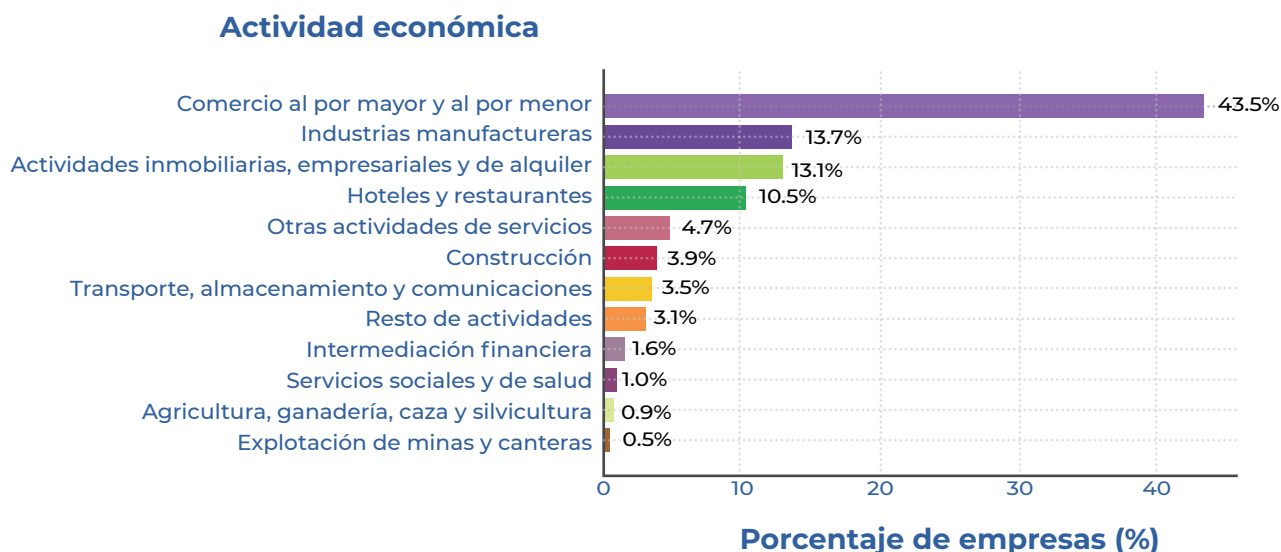
Figura 3.1. Aspectos de la actividad económica en las pymes



Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en la figura 3.2 se refleja la necesidad de intervenir con herramientas de productividad a las pequeñas y medianas empresas del sector terciario, permitiendo que sean más competentes en el mercado en el que se desenvuelven. Para saber qué herramientas adoptar en pymes del sector servicio, se busca información sobre las de Medellín [4], buscando la posibilidad de la utilización de herramientas de la productividad en las pequeñas y medianas empresas del sector terciario. Este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo de empresa inteligente e innovadora para las pymes del sector servicios en Medellín, en consonancia con los principios de la industria 4.0 [2], [3]. Específicamente, se busca identificar las técnicas *lean* más relevantes para este tipo de empresas, evaluar los beneficios de su adopción en términos de productividad y proponer un modelo de aplicación adaptado a sus necesidades.

Figura 3.2. Micros y pequeñas empresas según actividad económica



Fuente: elaboración propia.

Se utilizó un cuestionario para recopilar datos de las empresas sobre el uso de métodos *lean* y su aplicación en las pequeñas y medianas empresas (pymes) del área de servicios de Medellín. A partir de cuestionarios con expertos, el objetivo es comprender los desafíos comunes que enfrentan las empresas al adoptar, o ya haberlo hecho, técnicas o prácticas de Lean Manufacturing en sus instalaciones y seleccionar las herramientas *lean* más útiles para ellas.

Se han realizado muchas investigaciones en todo el mundo en el campo de Lean Manufacturing y muchos de los autores han dado soluciones, pero en las empresas del sector servicio de la ciudad existe una brecha en esta dirección.

Este estudio proporciona una breve descripción y explicación de los principios *lean* que se utilizan en las pymes del sector servicios, provee enfoques sobre cómo seleccionar las mejores herramientas *lean* para las empresas e identifica las implicaciones más útiles de

estas en los sistemas al producir exactamente lo que el cliente desea, al costo mínimo y con defectos muy pequeños o nulos.

Por eso, la razón principal de este estudio es llenar los vacíos en el desarrollo del modelo de empresas inteligentes en el aspecto de la organización. Cada empresa tiene un sistema único de servicios y recientemente algunos países están en proceso de desarrollar su modelo para la nueva era de la industria, como la industria 4.0 en Alemania.

En Medellín, no hay iniciativas en esta dirección y la selección de los principios de Lean Manufacturing es muy importante para desarrollar un modelo de empresa en lo que respecta a la industria 4.0. El modelo desarrollado podría aplicarse y será único y original para las empresas de la ciudad, especialmente para las pymes, dado que el objetivo principal es seleccionar las técnicas lean más útiles para desarrollar el modelo de empresas inteligentes innovadoras.

Una vez identificado el uso de las herramientas Lean Manufacturing más apropiadas en el sector servicios, se realiza un seguimiento a algunas de estas empresas en la productividad.

Este estudio busca analizar la aplicación de herramientas *lean* en empresas de servicios de Medellín, seleccionando y evaluando su impacto mediante el análisis envolvente de datos (DEA). Específicamente, se analizaron las mejoras en eficiencia operativa y reducción de costos tras la aplicación de 5S y Seis Sigma.

A pesar de la vasta literatura sobre Lean Manufacturing en el mundo, existe una brecha en su aplicación en el sector servicios de Medellín. Este estudio pretende contribuir al cierre de esta brecha, proporcionando una guía para la selección y aplicación de herramientas *lean* que permitan a las pymes de la ciudad alcanzar niveles óptimos de productividad y competitividad en la era de la industria 4.0.

3.2 Marco referencial

En el competitivo entorno empresarial actual, la eficiencia y la adaptabilidad son cruciales para el éxito. Tanto los gerentes como el personal deben dominar la organización y optimización de la prestación de servicios. *Lean* se erige como un enfoque fundamental para lograrlo, basándose en principios y técnicas ampliamente reconocidos en la manufactura, pero con creciente relevancia en el sector servicios [1], [2].

Aunque existen numerosos estudios sobre la aplicación de *lean* en diversos contextos, la investigación específica en el sector servicios, particularmente en ciudades como Medellín, sigue siendo limitada [3]. Históricamente, Lean Manufacturing ha demostrado su eficacia en la industria manufacturera, pero su potencial en la optimización de procesos de servicios está aún en exploración [4].

3.2.1 Lean Manufacturing

El término Lean Manufacturing surgió como una estrategia clave para mejorar la calidad y eliminar desperdicios, contribuyendo significativamente a la reducción de costos [5]. *Lean* se define como una filosofía integral que abarca la operación, estructuración, gestión y mejora continua de los sistemas de producción [6]. Su objetivo primordial es minimizar el desperdicio en inventario, esfuerzo humano, tiempo y espacio, respondiendo eficazmente a la demanda del cliente con productos de alta calidad, eficiencia y economía [7]. Esta perspectiva multidimensional incluye prácticas de gestión como sistemas de calidad, justo a tiempo, fabricación celular, equipos de trabajo y gestión de proveedores, enfocándose en producir lo necesario, cuando es necesario [8].

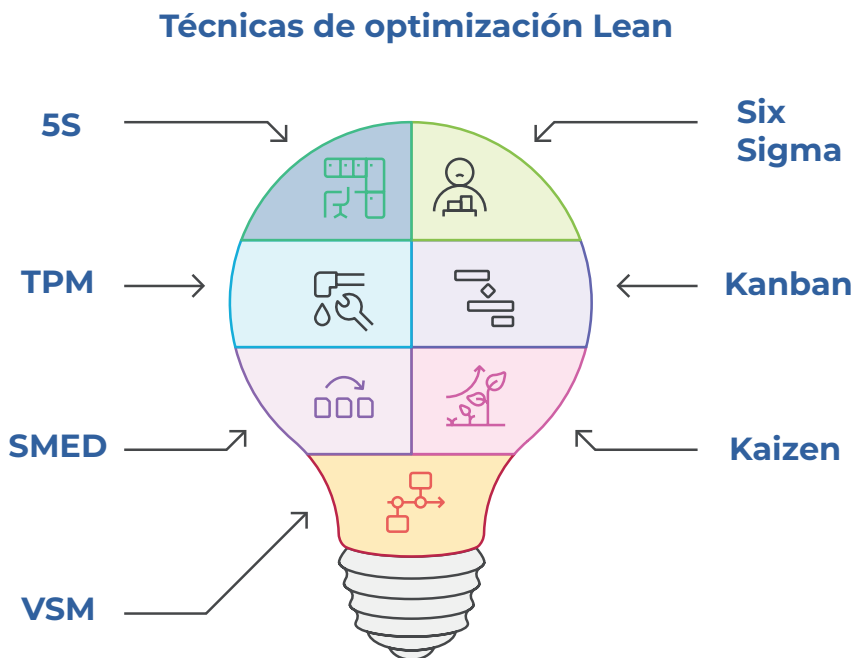
La aplicación de *lean* exige una cultura de mejora continua, donde la eliminación de desperdicios es un proceso iterativo y participativo [9]. Los beneficios tangibles incluyen la reducción de

tiempos de entrega, la optimización de procesos, la gestión eficiente de inventarios, la mejora en la gestión del conocimiento, el ahorro de costos y la eliminación de tareas innecesarias [10]. Además, fortalece la posición financiera, genera ventajas competitivas, mejora la calidad del servicio, estandariza procesos y eleva la satisfacción del cliente [11], [12]. Su enfoque en la resolución de problemas, la estandarización y el empoderamiento del empleado impulsa la confiabilidad y la rapidez del servicio, elementos clave para la ventaja competitiva [13].

3.2.2 Técnicas de Lean Manufacturing

La transición hacia una organización *lean* requiere un compromiso con la mejora continua y la adopción de diversas técnicas para optimizar los procesos [14]. Estas técnicas, diseñadas para reducir tiempos de respuesta, disminuir costos y mejorar la productividad y calidad, incluyen lo siguiente (véase la figura 3.3):

Figura 3.3. Herramientas Lean Manufacturing



Fuente: elaboración propia.

- 5S: una metodología para organizar, estandarizar y mantener un área de trabajo eficiente y productiva [15].
- Six Sigma: es un enfoque de gestión centrado en la satisfacción del cliente y la reducción de la variabilidad en los procesos [16].
- Mantenimiento productivo total (TPM): es un sistema para el mantenimiento preventivo de equipos, minimizando tiempos de inactividad y maximizando la eficiencia [17].
- Kanban: es un sistema de gestión visual para controlar el flujo de trabajo y optimizar la producción [18].
- SMED (Single-Minute Exchange of Die): son técnicas para reducir los tiempos de cambio y configuración de equipos [19].
- Kaizen: es un enfoque de mejora continua basado en pequeñas mejoras incrementales [20].
- Mapeo del flujo de valor (VSM): es una herramienta para visualizar y optimizar el flujo de materiales e información [21].

3.2.3 Análisis envolvente de datos (DEA)

Es una técnica no paramétrica que evalúa la eficiencia relativa de unidades de decisión, como empresas, mediante la comparación de múltiples entradas y salidas [22]. Su aplicación en este estudio, por medio del *software* Seumod, permite evaluar la eficiencia operativa de empresas de servicios antes y después de la aplicación de Lean Manufacturing. DEA es idóneo para este análisis por su capacidad para:

- Comparar empresas con múltiples indicadores sin una función de producción predefinida.
- Evaluar la eficiencia relativa respecto a las mejores prácticas.
- Identificar oportunidades de mejora en empresas menos eficientes [23].

3.3 Metodología

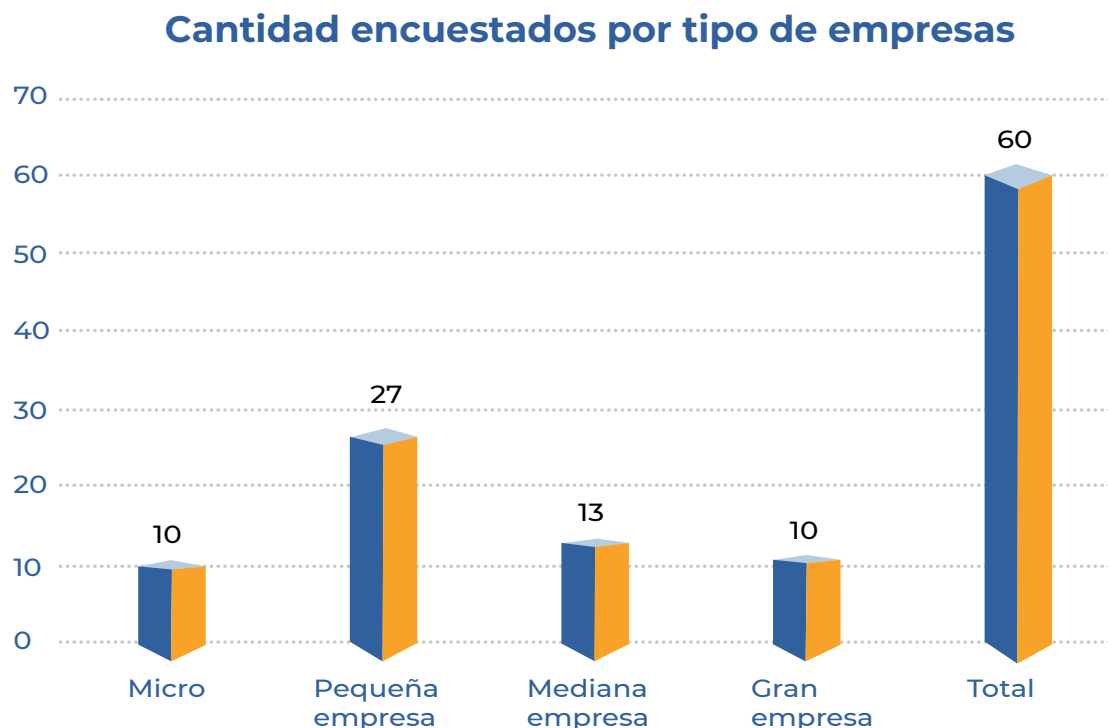
Este proyecto de investigación se concibió como un cuestionario-encuesta y entrevistas con gerentes para evaluar las técnicas de Lean Manufacturing más útiles dentro de las pymes en el sector servicios de Medellín.

Se entregaron cien cuestionarios a las empresas por correo electrónico y personalmente. Sesenta fueron respondidos de manera completa y correcta y se aceptan como tamaño de muestra. Así, de los cien cuestionarios enviados, sesenta se recibieron como regulares o completamente resueltos; la tasa de respuesta es del 60 %.

Las empresas catalogadas como pymes corresponden al 40 % de las encuestadas y clasificadas entre pequeñas y medianas, que operan en sectores como el comercio, turismo y educación. Se seleccionaron aquellas con más de cinco años de operación en el mercado.

El cuestionario se dividió en tres partes: las preguntas generales, los antecedentes sobre la empresa, el uso de *lean*, los beneficios y las barreras en la aplicación del sistema Lean Manufacturing. En la figura 3.4, se presenta el tamaño de la empresa (de acuerdo con las opciones presentadas en el cuestionario).

Figura 3.4. Tamaño de las empresas que se incluyen en la encuesta



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la posición en la empresa, los encuestados que respondieron los cuestionarios son los siguientes:

- 56.25 % de ellos son altos directivos.
- 37.50 % de ellos son mandos intermedios.
- 6.25 % de ellos son empleados que han trabajado en proyectos de Lean Manufacturing.

Las encuestas se centraron en identificar las principales necesidades de mejora productiva y las percepciones sobre la viabilidad de implementar herramientas Lean Manufacturing.

3.3.1 Procedimiento

Este estudio adoptó un enfoque cuantitativo mediante la aplicación de encuestas y el uso de DEA para evaluar la eficiencia operativa de cuatro empresas de servicios antes y después de la adopción de 5S y Seis Sigma. Se seleccionaron empresas de logística y transporte, salud y bienestar, soporte tecnológico y restaurantes.

Las fases del estudio son las siguientes (véase la figura 3.5):

Figura 3.5. Etapas metodológicas



Fuente: elaboración propia.

- Diagnóstico inicial: evaluación de indicadores clave (tiempo de respuesta, satisfacción del cliente, eficiencia operativa, costos, tasa de error y capacidad de respuesta).
- Capacitación y aplicación de herramientas *lean*.

- Medición posaplicación: evaluación de mejoras en eficiencia mediante DEA con Seumod.
- Comparación de resultados.

3.2.2 Análisis de datos

Los datos recopilados se analizaron para la medición de la productividad con la técnica análisis envolvente de datos. Además, se efectuaron estudios comparativos entre la productividad antes y después de la aplicación de las herramientas Lean Manufacturing seleccionadas.

3.4 Resultados y discusión

Se describieron las características básicas de los datos con estadísticas descriptivas e inferenciales y se utilizan hojas de cálculo y paquetes de programas SPSS para analizar los datos recopilados. El objetivo principal de esta investigación fue determinar cuáles son las técnicas *lean* más utilizadas y útiles para las pymes de la ciudad de Medellín, qué herramientas (técnicas) *lean* utilizan las empresas o aún se utilizan y cuáles son las oportunidades de mejoramiento. En la figura 3.6 se observa qué herramientas son las que las empresas utilizan.

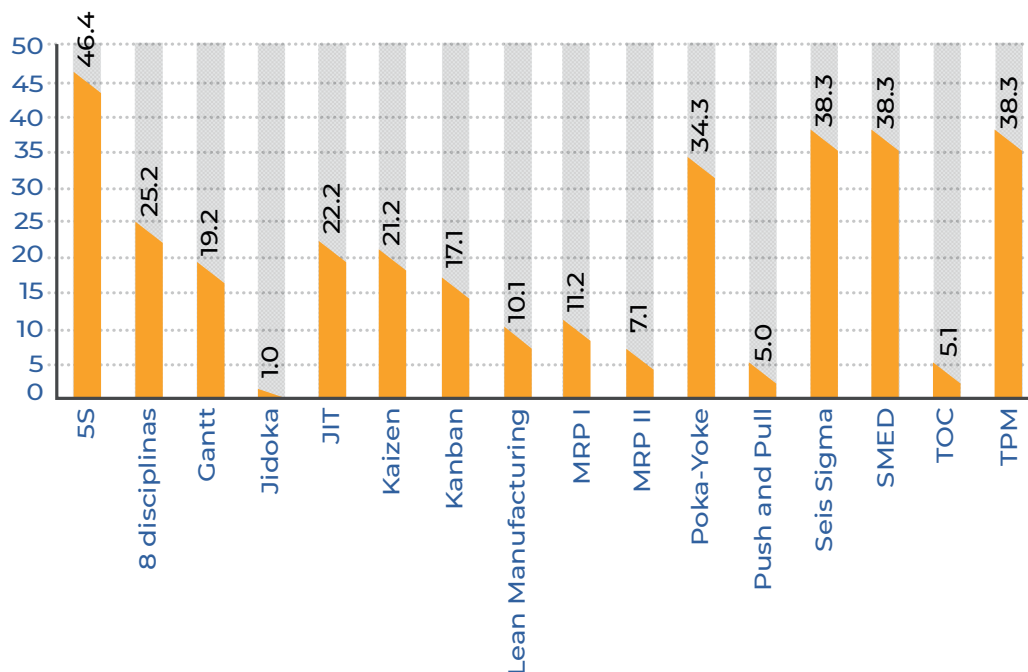
- El 46 % del total de las empresas encuestadas conoce la herramienta 5S.
- Las herramientas Seis Sigma, SMED y TPM son conocidas por un 38.3 % de las empresas.
- La herramienta que menos se conoce por la población encuestada, es Jidoka con 1 %.

Entre las empresas que usan herramientas Lean Manufacturing, el 92.98 % de estas saben que ayudan a mejorar procesos,

aumentando la productividad. En una pequeña porción identifican que son mecanismos que siempre mejoran la producción y su efectividad (véase la figura 3.7).

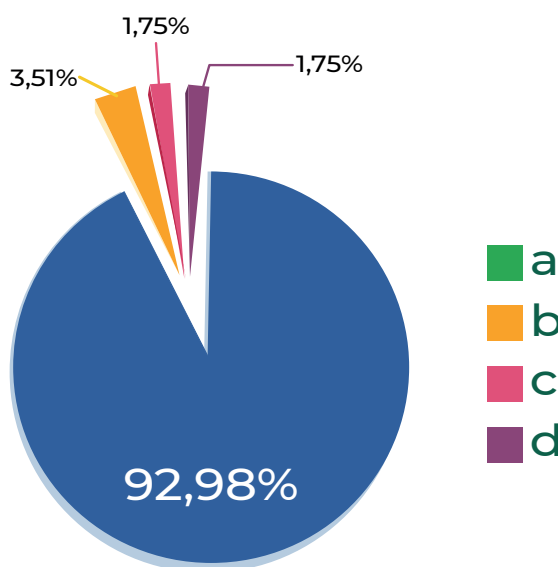
Figura 3.6. Herramientas Lean Manufacturing

Porcentaje (%)



Fuente: elaboración propia.

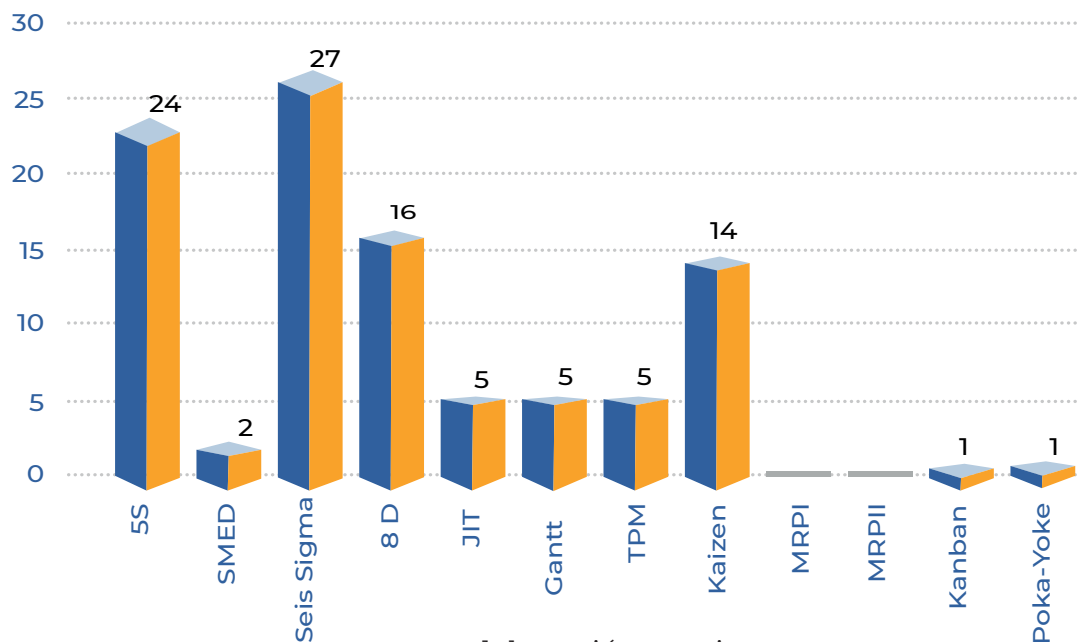
Figura 3.7. Porcentaje de empresas encuestadas



Fuente: elaboración propia.

El promedio de herramientas que conocen en las empresas es alrededor de 12. De acuerdo con los datos de la figura 3.8, se evidencia que los empresarios consideran que es viable la aplicación de las herramientas de la productividad en el sector servicios.

Figura 3.8. Conocimiento de empresarios de Lean Manufacturing



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la herramienta que se debe escoger para adoptar en el sector servicios es Seis Sigma, con una participación del 27 %, y como segunda opción está la herramienta 5S, con un total del 24 %.

En la tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos sobre la adopción de herramientas Lean Manufacturing en las empresas encuestadas. Se observa que la técnica más adoptada es 5S, seguida de Seis Sigma, mientras que herramientas como Kanban y SMED tienen menor utilización. Además, se identificaron oportunidades de mejora en costos, tiempos de respuesta y eficiencia operativa, con valores esperados de reducción que oscilan entre un 5 % y un 30 %, dependiendo de la herramienta aplicada.

Tabla 3.1. Datos sobre la adopción de herramientas Lean Manufacturing en empresas de Medellín

Empresa	5S (%)	Seis Sigma (%)	Kanban (%)	SMED (%)	Mejoras en costos (%)	Mejoras en tiempos de respuesta (%)	Mejoras en eficiencia (%)
EMPRESA_1	78	29	24	15	17.84	28.25	23.30
EMPRESA_2	68	55	24	33	11.07	6.76	13.85
EMPRESA_3	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_4	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_5	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_6	78	27	48	20	16.78	11.35	23.69
EMPRESA_7	58	33	41	46	15.03	12.38	17.77
EMPRESA_8	62	42	13	18	13.71	13.06	15.33
EMPRESA_9	50	59	39	25	10.58	26.22	18.14
EMPRESA_10	50	40	46	31	19.10	8.42	13.71
EMPRESA_11	63	35	32	52	19.60	22.72	19.60
EMPRESA_12	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_13	79	43	24	19	9.58	12.41	16.32
EMPRESA_14	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_15	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_16	61	48	22	36	19.92	20.29	11.84
EMPRESA_17	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_18	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_19	69	44	31	47	12.41	20.70	11.23
EMPRESA_20	77	26	37	23	7.68	9.86	24.59
EMPRESA_21	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_22	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_23	72	20	37	43	15.81	6.27	20.27
EMPRESA_24	51	27	37	17	9.62	27.17	21.14
EMPRESA_25	61	43	29	34	13.14	5.69	11.93
EMPRESA_26	64	30	39	50	12.63	19.47	14.29
EMPRESA_27	66	36	20	33	14.54	15.96	18.00
EMPRESA_28	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_29	55	54	34	17	13.85	13.20	23.98
EMPRESA_30	54	54	48	33	19.68	8.88	22.73
EMPRESA_31	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_32	0	0	0	0	0	0	0

Continúa...

Empresa	5S (%)	Seis Sigma (%)	Kanban (%)	SMED (%)	Mejoras en costos (%)	Mejoras en tiempos de respuesta (%)	Mejoras en eficiencia (%)
EMPRESA_33	46	58	36	21	11.52	26.51	23.67
EMPRESA_34	60	47	22	47	10.25	11.26	15.02
EMPRESA_35	48	26	12	54	14.68	5.97	15.79
EMPRESA_36	78	28	48	53	15.03	12.58	18.68
EMPRESA_37	57	27	15	32	17.96	18.43	17.32
EMPRESA_38	43	31	17	54	8.45	13.17	23.88
EMPRESA_39	64	53	36	15	12.49	25.70	23.89
EMPRESA_40	53	52	18	25	13.58	11.79	22.34
EMPRESA_41	48	42	46	42	16.53	29.13	17.73
EMPRESA_42	65	43	42	39	5.65	16.43	21.02
EMPRESA_43	41	56	33	37	19.92	26.05	18.54
EMPRESA_44	59	54	24	45	12.05	9.86	16.47
EMPRESA_45	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_46	46	41	41	49	18.25	22.49	21.22
EMPRESA_47	47	46	33	21	16.22	8.46	21.41
EMPRESA_48	74	54	21	30	19.30	8.32	17.52
EMPRESA_49	53	20	48	40	9.96	29.24	21.41
EMPRESA_50	56	54	11	16	13.29	22.86	18.03
EMPRESA_51	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_52	79	33	46	26	19.70	14.97	10.48
EMPRESA_53	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_54	41	20	11	51	9.59	23.60	12.55
EMPRESA_55	0	0	0	0	0	0	0
EMPRESA_56	43	45	37	23	9.03	9.61	17.37
EMPRESA_57	68	33	32	49	12.28	7.02	11.73
EMPRESA_58	57	58	46	33	10.59	15.71	18.11
EMPRESA_59	65	46	41	30	10.92	22.21	12.71
EMPRESA_60	73	28	42	17	17.66	6.45	18.63

Fuente: elaboración propia.

Los resultados sugieren que la adopción de herramientas *lean* aún es incipiente en muchas pymes del sector servicios en Medellín. Si bien la adopción de 5S y Seis Sigma es significativa, la

baja aplicación de herramientas como Kanban y SMED indica que todavía hay resistencia o desconocimiento sobre su aplicabilidad en el sector. Asimismo, las empresas que han adoptado estas metodologías esperan una mejora en la eficiencia operativa de hasta un 25 %, lo que evidencia el impacto potencial de una mayor difusión y capacitación en estas herramientas.

En la tabla 3.2, se evidencian las empresas que no utilizan técnicas de Lean Manufacturing y el porcentaje de estas que planean usarlas o no en el futuro. Centrándonos en las pequeñas y medianas empresas, del total de 40 categorizadas en este sector, el 43 % de las empresas no tienen aplicación de las herramientas para la productividad. El 62 % de empresas dijeron que planean usarlas en el futuro y el 38 % no lo tienen contemplado entre sus acciones.

Tabla 3.2. Aplicación de herramientas lean en las pymes

Empresa	Aplic. lean	5S (%)	Seis Sigma (%)	Kanban (%)	SMED (%)	Mejoras en costos (%)	Mejoras en tiempos de respuesta (%)	Mejoras en eficiencia (%)
Pyme_1	Sí	78	29	24	15	17.84	28.25	23.30
Pyme__2	Sí	68	55	24	33	11.07	6.76	13.85
Pyme__3	Sí	78	27	48	20	16.78	11.35	23.69
Pyme__4	Sí	58	33	41	46	15.03	12.38	17.77
Pyme__5	Sí	62	42	13	18	13.71	13.06	15.33
Pyme__6	Sí	50	59	39	25	10.58	26.22	18.14
Pyme__7	Sí	50	40	46	31	19.10	8.42	13.71
Pyme__8	Sí	63	35	32	52	19.60	22.72	19.60
Pyme__9	Sí	79	43	24	19	9.58	12.41	16.32
Pyme__10	Sí	61	48	22	36	19.92	20.29	11.84
Pyme__11	Sí	69	44	31	47	12.41	20.70	11.23
Pyme__12	Sí	77	26	37	23	7.68	9.86	24.59
Pyme__13	Sí	72	20	37	43	15.81	6.27	20.27

Continúa...

Empresa	Aplic. lean	5S (%)	Seis Sigma (%)	Kanban (%)	SMED (%)	Mejoras en costos (%)	Mejoras en tiempos de respuesta (%)	Mejoras en eficiencia (%)
Pyme__14	Sí	51	27	37	17	9.62	27.17	21.14
Pyme__15	Sí	61	43	29	34	13.14	5.69	11.93
Pyme__16	Sí	64	30	39	50	12.63	19.47	14.29
Pyme__17	Sí	66	36	20	33	14.54	15.96	18.00
Pyme__18	Sí	55	54	34	17	13.85	13.20	23.98
Pyme__19	Sí	54	54	48	33	19.68	8.88	22.73
Pyme__20	Sí	46	58	36	21	11.52	26.51	23.67
Pyme__21	Sí	60	47	22	47	10.25	11.26	15.02
Pyme__22	Sí	48	26	12	54	14.68	5.97	15.79
Pyme__23	Sí	78	28	48	53	15.03	12.58	18.68
Pyme__24	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__25	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__26	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__27	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__28	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__29	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__30	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__31	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__32	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__33	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__34	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__35	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__36	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__37	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__38	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__39	No	0	0	0	0	0	0	0
Pyme__40	No	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

¿Por qué estas empresas no tienen contemplado usarlas en el futuro?

Las empresas responden lo siguiente:

- No están informadas o no conocen sobre las técnicas de Lean Manufacturing el 40 %
- No entienden las técnicas y no están informadas de cómo se usan el 45 %
- Consideran que adoptar estas técnicas no es de beneficio para las empresas el 15 %

La fase de diagnóstico es la aplicación de las dos herramientas definidas en cuatro empresas de sector servicio donde no se adoptan estas. Se realiza un análisis inicial de las operaciones de las empresas, identificando las áreas con mayor potencial de mejora (véase la tabla 3.3).

Tabla 3.3. Operaciones empresas de servicios

Empresa	Tiempo de respuesta (h)	Satisfacción del cliente (%)	Eficiencia operativa (%)	Costos operativos (% de ingresos)	Tasa de error (%)	Capacidad de respuesta a demanda (%)	Área con mayor potencial de mejora
Logística y transporte	10.23	65 %	74 %	63.29 %	5.25 %	77 %	Reducción de costos
Salud y bienestar	22.91	65.45 %	78 %	38.49 %	8.34 %	48 %	Mejora en tiempos de respuesta
Soporte tecnológico	18.1	62 %	51 %	37.27 %	7.04 %	58 %	Mejora en tiempos de respuesta
Restaurante	15.17	90 %	89 %	37.33 %	5.07 %	62 %	Mejora en tiempos de respuesta

Fuente: elaboración propia.

El análisis de las operaciones de las cuatro empresas de servicios revela varias áreas con potencial de mejora. La empresa de logística y transporte presenta costos operativos altos, alcanzando el 63.29 % de sus ingresos, lo que sugiere la necesidad de optimizar sus procesos logísticos y mejorar la planificación de rutas para reducir gastos. Además, su satisfacción del cliente es baja (65 %), lo que indica que una reducción de costos y una mayor eficiencia operativa podrían generar una mejor percepción del servicio.

La empresa de salud y bienestar enfrenta un desafío en sus tiempos de respuesta, que alcanzan las 22.91 horas, afectando la satisfacción del cliente (65.45 %). Para mejorar su competitividad, es crucial reducir los tiempos de espera en la atención médica o los servicios de bienestar, optimizando procesos internos y aumentando su capacidad de respuesta a la demanda, que actualmente es baja (48 %).

Por otra parte, la empresa de soporte tecnológico presenta una eficiencia operativa baja (51 %) y tiempos de respuesta elevados (18.1 horas), lo que impacta negativamente en la experiencia del cliente (62 % de satisfacción). Para mejorar, esta empresa debe optimizar sus procesos internos, reducir los tiempos de atención y optimizar su capacidad operativa para atender las solicitudes de soporte de manera más ágil.

Finalmente, el restaurante tiene una alta satisfacción del cliente (90 %) y una eficiencia operativa destacada (89 %), pero sus tiempos de respuesta aún pueden mejorar, ya que alcanzan las 15.17 horas. A pesar de su buen desempeño en otras áreas, reducir los tiempos de entrega podría hacerla más competitiva en el mercado y fortalecer su posicionamiento.

En términos generales, los tiempos de respuesta representan una debilidad común en tres de las cuatro empresas, lo que in-

dica que mejorar la agilidad en la prestación de los servicios es una prioridad. Además, la empresa de logística y transporte debe enfocarse en la reducción de costos, mientras que la de soporte tecnológico necesita incrementar su eficiencia operativa para brindar un mejor apoyo técnico. La baja satisfacción del cliente en varias de las empresas también sugiere la necesidad de optimizar la experiencia del usuario por medio de procesos más eficientes y tiempos de atención más rápidos.

Se realiza un proceso de capacitación al personal en las dos herramientas seleccionadas.

La aplicación de Lean Manufacturing, mediante las herramientas 5S y Seis Sigma, representó una estrategia clave para mejorar las operaciones de las cuatro empresas de servicios analizadas. Estas herramientas contribuyeron a optimizar los procesos, mejorar la eficiencia y reducir costos, generando un impacto positivo en la calidad del servicio y la satisfacción del cliente.

La metodología 5S (clasificación, orden, limpieza, estandarización y disciplina) ayudó a mejorar la eficiencia operativa y la organización interna en las empresas, impactando directamente en la reducción de tiempos de respuesta y costos operativos. En la de logística y transporte, la instalación de 5S optimizó la gestión de inventarios, permitiendo un mejor almacenamiento y reduciendo los tiempos en la preparación y despacho de pedidos, lo que contribuyó a una mayor eficiencia en la distribución y a una reducción en los costos operativos. En la empresa de salud y bienestar, 5S mejoró la disposición de los equipos y suministros médicos, reduciendo los tiempos de búsqueda y espera en la atención de los pacientes, lo que se tradujo en una disminución en los tiempos de respuesta y un aumento en la satisfacción del cliente.

Por otro lado, en la de soporte tecnológico, la aplicación de 5S permitió una mejor organización de herramientas y documentación, facilitando la resolución de problemas y reduciendo el tiempo de respuesta en la atención al cliente. En el restaurante, esta metodología optimizó la cocina y las áreas de almacenamiento, reduciendo desperdicios y mejorando los tiempos de preparación y entrega de pedidos, lo que benefició la operación y la calidad del servicio prestado.

La metodología Seis Sigma, enfocada en la reducción de variabilidad y errores mediante la mejora de procesos basada en datos, permitió disminuir las fallas operativas y aumentar la calidad del servicio en cada empresa. En la de logística y transporte, Seis Sigma se centró en reducir errores en la cadena de suministro, mejorando la precisión en la planificación de rutas y evitando retrasos en las entregas, lo que aumentó la capacidad de respuesta y redujo costos. En la de salud y bienestar, su aplicación facilitó disminuir errores en la gestión de citas y en la asignación de recursos médicos, asegurando que los pacientes recibieran una atención más rápida y eficiente.

En el caso de la empresa de soporte tecnológico, Seis Sigma ayudó a minimizar la tasa de error en el diagnóstico de problemas tecnológicos, reduciendo la variabilidad en la calidad del servicio y mejorando la experiencia del cliente. Finalmente, en el restaurante, la reducción de errores en la preparación y entrega de pedidos garantizó que los clientes recibieran su comida en el menor tiempo posible y con la calidad esperada, fortaleciendo la fidelización y la reputación del negocio.

Por último se toman los datos de eficiencia de las empresas posteriores a la adopción de las herramientas Lean Manufacturing, por medio del *software* Seumod, se compara con los datos inicia-

les de productividad de la empresa y se revisa si se genera un aumento significativo de los procesos (véase la tabla 3.4).

Tabla 3.4. Indicadores tras la adopción de Lean Manufacturing

Empresa	Tiempo de respuesta (h)	Satisfacción del cliente (%)	Eficiencia operativa (%)	Costos operativos (% de ingresos)	Tasa de error (%)	Capacidad de respuesta a demanda (%)
Logística y transporte	7.68	75	89	53.80	3.68	96
Salud y bienestar	17.19	75	94	32.72	5.84	60
Soporte tecnológico	13.58	71	61	31.68	4.93	72
Restaurante	11.38	100	100	31.74	3.55	77

Fuente: elaboración propia.

Tras la aplicación de 5S y Seis Sigma, se notó una mejora significativa en los indicadores de desempeño de las empresas de servicios analizadas. Los tiempos de respuesta se redujeron considerablemente, lo que sirvió a las empresas para atender con mayor rapidez las necesidades de sus clientes. Esta reducción fue clave para optimizar la experiencia del usuario y mejorar la eficiencia operativa en cada una de las organizaciones.

Asimismo, la satisfacción del cliente aumentó de manera notable, reflejando el impacto positivo de la optimización de procesos y la reducción de errores en la prestación del servicio. Los clientes experimentaron una mayor confiabilidad y calidad en la atención recibida, lo que fortaleció la imagen y competitividad de las empresas en sus respectivos sectores.

La eficiencia operativa también registró una mejora considerable. Para su cálculo, se utilizó el análisis envolvente de datos (DEA)

mediante el uso del *software* Seumod, una herramienta diseñada específicamente para evaluar el desempeño de los procesos empresariales. Gracias a este enfoque, se logró identificar con precisión las áreas de mayor impacto dentro de cada empresa y optimizar la asignación de recursos para mejorar su desempeño. Con la aplicación de 5S, los espacios laborales fueron organizados de manera óptima, eliminando desperdicios y asegurando un flujo de trabajo más eficiente. Al mismo tiempo, Seis Sigma contribuyó a reducir la variabilidad en los procesos, minimizando la cantidad de defectos y garantizando una mayor estabilidad en las operaciones.

Por otro lado, los costos operativos se redujeron de forma significativa, ya que la eliminación de ineficiencias permitió un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. La disminución de errores y reprocesos evitó gastos innecesarios, optimizó la rentabilidad de las empresas y aseguró un uso más eficiente del capital.

Finalmente, la capacidad de respuesta a la demanda aumentó considerablemente, lo que permitió a las empresas adaptarse con mayor rapidez a las fluctuaciones del mercado y a las necesidades cambiantes de sus clientes. Esta mejora fue resultado de procesos más ágiles, mejor planificación y una reducción de los tiempos muertos en la ejecución de tareas clave.

La adopción de 5S y Seis Sigma generó mejoras apreciables en todos los indicadores evaluados. Los tiempos de respuesta se redujeron en un 25 %, mientras que la satisfacción del cliente aumentó en un 15 %. La eficiencia operativa, medida con DEA en Seumod, aumentó en un 20 %, lo que mostró un mejor uso de los recursos.

Resumen de mejoras posaplicación:

- Empresa de logística y transporte: reducción de costos del 63 % al 53 % y aumento de la eficiencia al 89 %.
- Empresa de salud y bienestar: reducción de tiempos de respuesta de 22.91 a 17.19 horas, aumento de eficiencia al 94 %.
- Empresa de soporte tecnológico: reducción de errores en un 30 % y aumento de eficiencia al 61 %.
- Restaurante: aumento de satisfacción del cliente al 100 % y mejora de eficiencia al 100%.

3.5 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la aplicación de Lean Manufacturing en empresas del sector servicios genera mejoras significativas en la eficiencia operativa, la reducción de costos y la satisfacción del cliente. La adopción de 5S favoreció una mejor organización de los espacios de trabajo y reducción de tiempos improductivos, mientras que Seis Sigma contribuyó a minimizar errores y a mejorar la calidad del servicio.

El uso del análisis envolvente de datos (DEA), valiéndose del *software* Seumod, permitió cuantificar estas mejoras y demostrar que la optimización de los procesos por medio de herramientas Lean Manufacturing es viable en empresas de servicios.

A pesar de los beneficios observados, se identificaron algunas barreras para la adopción de estas herramientas, como el desconocimiento de su aplicabilidad y la resistencia al cambio en algunas empresas. Se recomienda que futuras investigaciones amplíen la muestra de empresas evaluadas y realicen un seguimiento a largo plazo para medir la sostenibilidad de las mejoras obtenidas.

La adopción de metodologías *lean* en el sector servicios representa una oportunidad para aumentar la competitividad y eficiencia de las pymes en Medellín, facilitando su adaptación a los retos de la industria 4.0.

Agradecimientos

Al proyecto de investigación “Análisis envolvente de datos bajo industria 4.0”, del Grupo de Investigación Calidad, Metrología y Producción del ITM. También, a Juliana Pareja, coordinadora de Gestión de la Innovación, Conocimiento y Sostenibilidad de la compañía HVM Ingenieros, quien acompañó el proceso de comprensión de la base de datos para usarla como caso de estudio y aportó información descriptiva para el desarrollo de la modelación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses de índole comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

La presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores, del proyecto, el entorno, la sociedad o el medioambiente.

Referencias

- [1] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, 2nd ed. New York, NY: Simon and Schuster, 2003.
- [2] Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, “Análisis del tejido empresarial de Medellín y Antioquia,” Medellín, Colombia, 2023. [Online]. Available: <https://www.ccb.org.co/>. [Accessed: Nov. 2023].
- [3] M. Liker, *The Toyota Way: 14 Management Principles From The World's Greatest Manufacturer*, 1st ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- [4] M. Rother and J. Shook, *Learning to See: Value-Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*. Lean Enterprise Institute, 2009.
- [5] P. Hines, M. Holweg, and N. Rich, “Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking,” *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 24, no. 10, pp. 994–1011, 2004, doi: 10.1108/01443570410558049.
- [6] R. Shah and P. Ward, “Defining and developing measures of lean production,” *J. Oper. Manag.*, vol. 25, no. 4, pp. 785–805, 2007, doi: 10.1016/j.jom.2006.10.007.
- [7] F. A. Abdulmalek and J. Rajgopal, “Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector study,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 107, no. 2, pp. 223–236, 2007, doi: 10.1016/j.ijpe.2006.09.006.
- [8] T. Melton, “The benefits of lean manufacturing: what value streams have to offer,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 83, no. 6, pp. 662–673, 2005, doi: 10.1205/cherd.04318.
- [9] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean Solutions: How Companies and Customers Can Create Value and Wealth Together*. Simon and Schuster, 2010.
- [10] J. K. Liker and M. Hoseus, *Toyota Culture: The Heart and Soul of the Toyota Way*. McGraw-Hill, 2008.
- [11] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press, 1988.

- [12] P. Dennis, *Lean Production Simplified*. CRC Press, 2007.
- [13] R. Shah and P. Ward, "Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance," *J. Oper. Manag.*, vol. 21, no. 2, pp. 129–149, 2003, doi: 10.1016/S0272-6963(02)00108-0.
- [14] S. Bhasin, "Lean management beyond manufacturing—a holistic approach," *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 23, no. 7, pp. 876–897, 2012, doi: 10.1108/17410381211269026.
- [15] R. Gapp, R. Fisher, and K. Kobayashi, "Implementing 5S: a methodology for workplace organization," *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 19, no. 7, pp. 617–634, 2008, doi: 10.1080/14783360802108451.
- [16] J. Antony, "Six sigma vs lean manufacturing vs lean six sigma," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 19, pp. 5619–5622, 2014, doi: 10.1080/00207543.2014.919246.
- [17] S. Nakajima, *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press, 1988.
- [18] Y. Monden, *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-in-Time*. CRC Press, 2011.
- [19] S. Shingo, *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Productivity Press, 1985.
- [20] M. Imai, *Kaizen (Ky'zen): The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill/Irwin, 2012.
- [21] P. Hines and N. Rich, "The seven value stream mapping tools," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 17, no. 1, pp. 46–64, 1997, doi: 10.1108/01443579710157978.
- [22] A. Charnes, W. W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 429–444, 1978, doi: 10.1016/0377-2217(78)90138-8.
- [23] W. W. Cooper, L. M. Seiford, and K. Tone, *Introduction to data envelopment analysis and its uses: with DEA-solver software and references*, Springer US, 2006.





Capítulo 04

Modelo para la adopción digital de un sistema de gestión del conocimiento para corporaciones de tratamientos psicosociales

Model for the Implementation Digital of a Knowledge Management System for Psychosocial Treatment Corporations

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.04>

Diana M. Montoya-Quintero ¹

Luisa Fernanda Bermúdez ²

Juan M. Cogollo-Flórez ³

Luis Fernando Galván ⁴

¹ Docente investigadora, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-0761-4067, correo electrónico dianamontoya@itm.edu.co

² Estudiante de la Ingeniería de la Calidad, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0001-8000-5503, correo electrónico luisabermudez244369@correo.itm.edu.co

³ Profesor titular. Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-6101-3134, correo electrónico juancogollo@itm.edu.co

⁴ Profesional especializado. Facultad de Ingenierías, Politécnico Jaime Isaza Cadavid, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0001-8895-1027, correo electrónico luisgalvan@elpoli.edu.co

Resumen. En la búsqueda de los enfoques de mejora continua en una organización, se ha encontrado la viabilidad de los sistemas ciberfísicos para el logro de la interconexión de los procesos, estableciendo variables controladas digitalmente que permiten el desarrollo eficiente de los sistemas de gestión. Se presenta el diseño de un modelo para la gestión de un sistema de conocimiento que permite una relación digital en la mejora continua de un caso de estudio en la corporación Lazos y Vida, que se dedica a la orientación social, psicológica y académica de cuidadores y niños en etapa de cáncer, y no cuenta con un sistema que le proporcione historiales de sus activos de conocimiento para el control de la información y los procesos de alianza externa e interna, por lo que necesita contar con un mecanismo que le permita la vigilancia de la trazabilidad de la gestión documental y la comunicación digital para fortalecer los vínculos de comunicación asertiva con comunidades y organizaciones de su interés.

Palabras clave: corporaciones, cuidadores, infancia con cáncer, sistemas de gestión de conocimiento.

Introducción



En los últimos años, los medios de transmisión de la información utilizados en las organizaciones fueron cambiando debido a la nueva adaptación de sistemas enfocados en el procesamiento de diversos tipos de información, lo que creó un vínculo entre sistemas de información y conocimiento organizacional, y se considera la información (datos) un suministro esencial para la generación de ideas innovadoras ligadas al cumplimiento de los objetivos trazados por una organización.

Además, los impactos que han generado los sistemas de gestión del conocimiento en los procesos de mejora continua han resultado eficientes porque se trabajan desde un pensamiento integrador; es decir, para obtener un alto rendimiento en los procesos es fundamental mantener la trazabilidad de la gestión del

conocimiento y la gestión de la información, conllevando aplicar los sistemas de gestión del conocimiento que permita el desarrollo de una línea emergente enfocada en crear, recopilar, organizar y difundir el conocimiento desde el control de la información hasta los procesos de la corporación Lazos y Vida para el fortalecimiento de las actividades que contribuyen a la mejora de la calidad de vida de niños y adolescentes con diagnóstico de cáncer y de sus familias.

Aunque el objetivo de varias investigaciones se ha concentrado en el estudio de modelos de éxito de los sistemas de conocimiento que faciliten e incorporen el campo del conocimiento en los sistemas ciberfísicos, se sigue percibiendo la ausencia de elementos que reúnan los diferentes enfoques del conocimiento aplicables a cualquier tipo de organización [1]. Existen diferentes enfoques en los cuales se basa la gestión del conocimiento; algunos pueden presentar los resultados esperados y otros resultan ser poco adecuados.

La calidad de los sistemas de gestión del conocimiento depende de los procesos colectivos de que disponen las organizaciones para la construcción de nuevas metodologías destinadas a abordar un campo tan complejo que requiere de ser integrado con otras disciplinas relacionadas con la ciencia organizacional, la gestión del capital humano, la gestión estratégica, haciendo énfasis en la pedagogía, la sociología, la psicología y los sistemas de información para el manejo de los datos [2], [3].

Se diseña un modelo para la aplicación futura de un sistema de gestión del conocimiento (SGC) que permita la relación digital en la mejora continua de la corporación Lazos y Vida, donde surge la necesidad de optimizar los procesos que se llevan a cabo en trabajo social, pedagogía y psicología porque el manejo de estos de forma manual afecta el rendimiento eficiente del capital humano

e implica la pérdida de información al recolectarse de forma independiente y la gran incertidumbre al tomarse decisiones con base en datos que carecen de una gestión adecuada.

Por esta razón, se pretende contribuir al fortalecimiento de los activos de conocimiento, la gestión documental y la gestión de la información para avanzar en el mejoramiento de los procesos, logrando la conexión de estos para obtener resultados más favorables y alcanzar los propósitos de nuevas alianzas con miras a la innovación social.

4.2 Marco referencial

4.2.1 Sistemas de gestión del conocimiento

El alto rendimiento organizacional, mediante el desarrollo y adopción de modelos de éxito para los sistemas de gestión del conocimiento, comprende tres factores integradores de calidad como son el producto o servicio (que contribuye a la parte técnica), los procesos (que aportan a la funcionalidad) y el personal (como fuente principal de conocimiento).

La integración de estos factores asegura el cumplimiento tanto de las necesidades de los clientes como de las expectativas de las organizaciones porque, mediante este camino, se pueden contrarrestar las barreras asociadas a la poca capacidad de administración de la información y de adaptabilidad a las nuevas tecnologías, así como concebir los nuevos aportes del recurso humano desde sus áreas de conocimiento [4].

La importancia de los sistemas de gestión del conocimiento radica en los impactos positivos que proporciona predecir la efectividad de las soluciones ante los problemas de manejo de la información, estandarización de los procesos con las nuevas

tecnologías, el diseño de rutas para los trabajadores del conocimiento y la eliminación de costos que aportan poco valor a las operaciones de las organizaciones [3], [5].

Si bien existen diferentes modelos de SGC, como se presentan a continuación, ninguno de ellos se adapta a las necesidades específicas de la corporación Lazos y Vida, ya que su misión y visión se enfocan en objetivos psicosociales como motor principal de su servicio y los modelos existentes no integran el proceso ciberfísico al capital humano.

4.2.2 Modelo de Jennex y Olfman

Tiene 4 enfoques fundamentales basados en la calidad del sistema, del servicio, la satisfacción del cliente y los beneficios percibidos desde una perspectiva de éxito. Estos factores están sumergidos en dos grandes dimensiones: la calidad del servicio y la calidad del sistema, porque se busca medir constantemente los componentes de gestión del conocimiento que participan en todos los procesos [6].

4.2.3 Modelo de IS de Delone y McLean

Fue diseñado con una visión hacia los sistemas de información, facilitando la adaptabilidad del modelo a las nuevas tecnologías que están rigiendo los procesos de las organizaciones. Además, cuenta con las siguientes categorías: calidad del sistema, calidad de la información, calidad del servicio, satisfacción del cliente, impacto individual e impacto empresarial, dejando por fuera aspectos con relación a los elementos diferenciadores como el fortalecimiento del conocimiento en el recurso humano [7].

4.2.4 Modelo de C. Kulkarni

Se basó en lo propuesto por el modelo IS de Delone y McLean, diferenciándose en la fusión de los impactos individual y empresarial por utilidad percibida como resultado del intercambio de conocimientos. Sin embargo, está en desventaja al excluirse los pilares más importantes de los sistemas de gestión del conocimiento: la cultura organizacional, la comunicación asertiva y la calidad del personal [5].

4.2.5 Modelo de Rao y Bryson

Hace énfasis en la calidad del conocimiento, del retenedor del conocimiento codificado, personalizado y la calidad del buen uso del conocimiento [8].

4.2.6 Modelo de Owlia

A diferencia de otros modelos, este se centró en la calidad del proceso de sistema de gestión del conocimiento, integrando la funcionalidad, la integridad, la confiabilidad, la usabilidad, la facilidad en el servicio, la flexibilidad y la seguridad [6], [9].

4.2.7 Modelo de Abdul Rahman y Prakash

Está enfocado en todas las características que aportan a la calidad en el sistema de gestión del conocimiento, integrando todos los campos multidisciplinarios que aplican a este [4].

4.2.8 Calidad de los sistemas de información

La calidad de los datos se caracteriza por cinco pilares fundamentales como la precisión (datos que representan un valor verdadero), la credibilidad (datos de fuentes confiables), la consis-

tencia (datos coherentes que no contradicen otra información), la integridad (datos completos y disponibles) y la actualidad (datos relevantes para los usuarios) [10], [11], [12], [13].

La existencia de estos pilares facilita el manejo del *big data* y la eliminación de datos erróneos que contribuyen a la creación de falsas proyecciones de inversión [14], ocasionando la afectación de la productividad laboral y la oportunidad de automatizar los procesos con un nivel real de calidad de datos porque los datos son un requisito esencial en el análisis de cualquier situación: «Usted no puede ser analítico sin datos, y no puede ser realmente bueno en análisis, sin datos realmente buenos» [15].

Con la llegada de la cuarta revolución industrial, la calidad de los datos se ha convertido en el motor de funcionamiento de las tecnologías 4.0 que cuentan con un enfoque de digitalización de los procesos, involucrando indudablemente el manejo de datos confiables para obtener resultados satisfactorios.

Una de las tecnologías que ha presentado características críticas al momento de la aplicación es el internet de las cosas (IoT), debido a la cantidad de datos tan variados que pueden ser utilizados en la operación de un proceso, tales como los arrojados por sensores, los que definen las características de los datos arrojados por el sensor, los que representan las características del sensor, los internos del proceso y los externos [10], [16].

Esta especificación de datos demuestra la importancia de mejorar la calidad de estos antes de cualquier proceso que conlleve el análisis, razón por la cual se establecen dos tipos de enfoques para alcanzar la mejora de la calidad de los datos; estos son el enfoque basado en datos cuya finalidad es la corrección de no conformidades de datos aleatorios y el enfoque basado en proce-

sos, que consiste en la identificación y eliminación de las causas que generan la no conformidad de los datos.

El enfoque que hasta el momento ha tenido un gran impacto en los datos de IoT ha sido el basado en procesos, por su componente integrador al momento de realizar la evaluación de calidad de los datos, involucrando directa o indirectamente a todas las partes interesadas dentro del proceso de mejora de los datos de IoT [16], [17].

Cabe resaltar que el tema de IoT no ha sido la única tecnología 4.0 que se ha analizado con relación a la calidad de los datos porque, como bien se conoce, el análisis del *big data* ha sido considerado la herramienta estrella en áreas de optimización e innovación de la industria 4.0, situación que ha generado la creación de un modelo orientado a la gestión de la calidad de los datos por medio de interfaces que detectan y corrigen las desviaciones en la calidad de los datos, manteniendo protegido el *big data* de una organización para la adecuada toma de decisiones basada en los datos allí contenidos [13], [14].

Por otra parte, una de las estrategias que demuestra la confiabilidad de los datos utilizados en la toma de decisiones es la medición del sistema de información donde se encuentran almacenados los datos de forma estructurada en la organización mediante el modelo propuesto en ISO/IEC 25012 y los estándares de evaluación de la calidad de los datos propuestos en la ISO/IEC 25024, definidos por cinco características que favorecen la efectividad en el proceso de evaluación; tales características están determinadas por la facilidad en la interpretación, la facilidad en la aplicación, la facilidad de acceso por bajo costo, resultados precisos y la facilidad en la compatibilidad de los datos [11], [17].

4.3 Metodología

Se realiza un estudio exploratorio, teniendo como base la recolección de información con la técnica de la encuesta, aplicada a los colaboradores fijos de la dirección de servicios y recursos de información de la corporación Lazos y Vida de la ciudad de Medellín; se efectúan entrevistas en profundidad con cada una de las psicólogas, sociólogas, pedagogas y con el representante legal de la corporación; se hizo la observación directa y participante con cuatro de los coordinadores de los procesos y de la oficina administrativa; se analizó toda la bibliografía disponible al respecto.

También, se adelanta un estudio descriptivo a partir de encuestas existentes en la corporación, las cuales fueron aplicadas a los cuidadores y pacientes infantiles oncológicos; se pudieron plantear hechos e hipótesis relacionados con el tema de la gestión del conocimiento. El análisis documental permitió identificar los proyectos y actividades aislados que se llevan a cabo actualmente y que pueden hacer parte del sistema de gestión del conocimiento diseñado especialmente para dichas corporaciones.

Se identifican cuatro fases principales para el diseño del modelo de un sistema de gestión del conocimiento para la corporación:

Fase 1

Diagnóstico inicial: por medio de cuestionarios y entrevistas con el personal a cargo de la corporación.

Fase 2

Identificación de modelos de gestión del conocimiento basados en el tratamiento de la información.

Fase 3

Diagnóstico: se obtiene de forma cualitativa y cuantitativa utilizando un sondeo de estrategias (entrevistas directas con los expertos colaboradores de la corporación Lazos y Vida).

Fase 4

Elementos tenidos en cuenta para el diseño del modelo del sistema de gestión del conocimiento, basados en las etapas de un modelo de investigación como fueron el análisis documental, las encuestas aplicadas, las entrevistas en profundidad a los jefes de cada proceso, la observación directa y participante; esto, con el fin de seleccionar los elementos utilizados en el modelo.

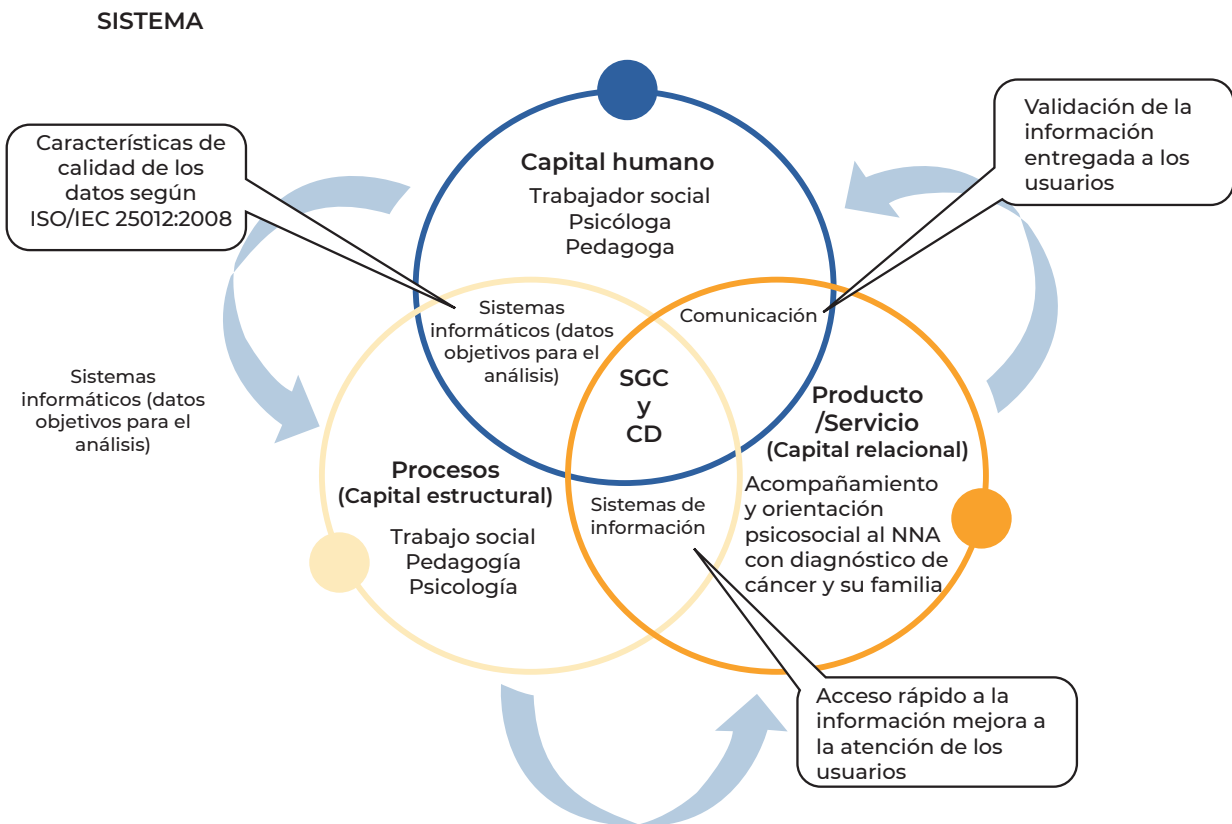
4.4 Resultados

Para el diseño del modelo, nos enfocamos en el proceso metodológico de estandarización basado en la caracterización en la calidad de la información de las corporaciones de cancerología infantil de la ciudad de Medellín, corporaciones que se encargan del estudio psicosocial y comportamental de los acompañantes (cuidadores) de los niños con cáncer y que actualmente en el país no cuentan con información de los estudios realizados que les permita centralizar y diagnosticar el comportamiento de las familias o acompañantes de esta población.

El objetivo de estas corporaciones es la intervención en un tratamiento temprano que permita la integridad del proceso. Para esto, se propone sistematizar la información con técnicas de procesamiento de datos y estadística avanzada, con el fin de gestionar indicadores de información y generar un nuevo conocimiento o patrón de orientación en la toma de decisiones frente al procedimiento psicosocial con los actores. Por lo anterior, es resultado de esta primera etapa de la investigación el diseño de un modelo para la adopción de un sistema de gestión del conocimiento (SGC), el cual se basa en el análisis y requisitos arquitectónicos para su construcción.

El modelo está representando los componentes de aplicación y determinación en una postura adecuada a los estudios realizados dentro de la institución Lazos y Vida. Se seleccionaron elementos de herramientas tecnológicas con dimensiones en la existencia de la calidad de la información; se tienen en cuenta la normalización en los sistemas de gestión de la información y la estandarización de los procesos. El modelo busca unificar un registro único, certero y fiable para tener mayor vigilancia y control de la información al monitorizar los indicadores, que aportan en las políticas de atención, e investigaciones sobre los distintos condicionantes que influyen en la enfermedad oncológica de niños y jóvenes, como se observa en la figura 4.1.

Figura 4.2. Modelo sistema de gestión del conocimiento corporación Lazos y Vida



Fuente: elaboración propia.

En este modelo se representa la relación que debe existir entre el sistema de gestión del conocimiento (SGC) y la gestión de la calidad de los datos (CD), además de considerar tres grandes conjuntos como pilares de todo el sistema que se encuentran, a su vez, enlazados por la calidad (C).

El primer conjunto hace énfasis en la fuente principal de conocimiento, recopilando el capital humano que desarrolla las actividades de los procesos misionales. El segundo está relacionado con la funcionalidad del sistema al comprender el desarrollo de la integración de los procesos, compartiendo con el primer conjunto la relación entre los sistemas informáticos debido a las características y los parámetros que se deben seguir al momento de realizar la gestión de la información. En el tercer conjunto se relaciona el servicio ofrecido como resultado de la actuación de los dos anteriores; en esta etapa hace presencia el eslabón de verificar el ciclo de mejora continua, partiendo de la información entregada por los cuidadores, niños y adolescentes al capital humano y de la viabilidad de los sistemas ciberfísicos al momento de entregar un resultado final.

4.5 Consideraciones finales

Una vez se socializa el modelo con el personal de la corporación, se dan consideraciones sobre los términos de ventaja competitiva y beneficios de la innovación al optimizar sus procesos, dejando visualizar que es difícil aplicar un SGC sin un modelo que permita a todos comprender el acceso rápido a la información y su gestión en la toma de decisiones.

Se concluye por los expertos que interactúan en el proyecto, que la toma de decisiones podría mejorar notablemente una vez se adopte el SGC, lo que puede marcar una gran diferencia en el

modelo corporativo de la institución; de igual forma, el modelo deja visualizar los procesos por intervenir y proporciona una representación visual de las etapas y el flujo de métodos que tanto las partes interesadas técnicas como las no técnicas comprenden fácilmente y ayuda a comunicar los procesos oficiales, mejorar las operaciones y planificar los proyectos de automatización a intervenir para la población objetivo de este proyecto.

4.5.1 Conclusiones

Se validó que el modelo permitió visualizar la metodología para estandarizar el proceso de información dentro de las corporaciones de cancerología infantil, contribuyendo a unificar los procedimientos del manejo de la información con la finalidad de crear patrones y guiones sobre los diagnósticos y tratamientos que se requieren.

Si bien la calidad de los datos es un proceso de acondicionamiento para satisfacer las necesidades concretas de los líderes corporativos, estos dan respuesta a las decisiones basadas en datos erróneos que pueden tener un efecto nocivo sobre su pertinencia, el control estadístico de la calidad mediante diferentes técnicas que están acompañadas de herramientas 4.0, trata rápidamente la ocurrencia de la información, cuando estas causas son asignables en investigaciones con efectos dudosos en sus resultados, permitiendo la justificación de su eliminación para un nuevo procesamiento, ya que, a medida que se van registrando las mediciones, nos va mostrando cómo se reparten y se agrupan o clasifican para generar resultados de interés en la toma de decisiones.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses de índoles comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

La presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno, la sociedad o el medioambiente.

Referencias

- [1] Y. L. Rodríguez, "Mejores prácticas para gestionar el conocimiento según la ISO 30401," *Signos*, vol. 11, no. 2, pp. 9–20, 2019.
- [2] A. Brahmane *et al.*, "An efficient procedure for classification of big data using the deep learning enabled spark architecture and machine learning," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 2662–2668, 2019.
- [3] K. Porsev *et al.*, "Integration of Knowledge Management Systems and Product Data in a single Information Space of a High-Tech Enterprise," in *Proc. Int. Conf. Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, Yaroslavl, 2021, pp. 42–45.
- [4] A. Abdul and P. G. Prakash, "A quality model design for Knowledge Management System: Unified Quality Perceptive," in *Proc. 2nd Int. Conf. Electronics and Sustainable Communication System (ICESC)*, Coimbatore, 2021, pp. 2004–2009.
- [5] J. Selwyn and A. Rahman, "A Novel Approach to Design Quality Model for Knowledge Management Systems," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 872–877, 2020.
- [6] S. Smolnik *et al.*, "Where to Look for Knowledge Management Success," in *Proc. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, 2012, pp. 3969–3978.
- [7] W. Hsiang and Y. Tarng, "Investigating the success of knowledge management: An empirical study of small- and medium-sized enterprises," *Asia Pac. Manag. Rev.*, vol. 21, no. 2, pp. 79–91, 2016.
- [8] L. Rao *et al.*, "Towards defining dimensions of knowledge system quality," *Expert Syst. Appl.*, vol. 33, no. 2, pp. 368–378, 2007.
- [9] M. Owlia *et al.*, "A framework for quality dimensions of knowledge management systems," *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 21, no. 11, pp. 1215–1228, 2010.

- [10] S. Rafi *et al.*, "Multicriteria Based Decision Making of DevOps Data Quality Assessment Challenges Using Fuzzy TOPSIS," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 46958–46980, 2020.
- [11] F. Gualo *et al.*, "Data quality certification using ISO/IEC 25012: Industrial experiences," *J. Syst. Softw.*, vol. 176, p. 110938, 2021.
- [12] S. McCord *et al.*, "Ten practical questions to improve data quality," *Rangelands*, vol. 44, no. 1, pp. 17–28, 2022.
- [13] O. Kramer *et al.*, "The impact of data quality defects on clinical decision-making in the intensive care unit," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 209, p. 106359, 2021.
- [14] R. Gu *et al.*, "SparkDQ: Efficient generic big data quality management on distributed data-parallel computation," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 156, pp. 132–147, 2021.
- [15] T. Davenport *et al.*, *Analytics at Work: Smarter Decision, Better Results*. Massachusetts: Harvard Business Press, 2010.
- [16] S. Kim *et al.*, "Organizational process maturity model for IoT data quality management," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 26, p. 100256, 2022.
- [17] A. Valencia-Parra *et al.*, "DMN4DQ: When data quality meets DMN," *Decis. Support Syst.*, vol. 141, p. 113450, 2021.



Capítulo 05

Flexibilización de procesos: una oportunidad para el escalamiento industrial de procesos de laboratorio

Process Flexibility: An Opportunity for Industrial Scaling of Laboratory Processes

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.05>

Olga Lucía Larrea-Serna ¹
Natalia Correa-Hincapié ²
Andrés Felipe Montoya-Tobón ³

¹ Docente ocasional, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050036, Medellín, Colombia. ORCID 0000-0003-3261-1247, correo electrónico olgalarrea@itm.edu.c

⁰² Docente ocasional, Departamento de Calidad y Producción, Instituto Universitaria ITM, 050036, Medellín, Colombia. ORCID 0000-0002-0967-3952, correo electrónico nataliacorrea@itm.edu.co

³ Docente ocasional, Departamento de Diseño, Institución Universitaria ITM, 050036, Medellín, Colombia. ORCID 0000-0001-6004-4855, correo electrónico andresmontoya@itm.edu.co

Resumen. Las dinámicas comercial y económica internacionales han propiciado la generación de empresas de rápido crecimiento tecnológico, que se caracterizan por tener iniciativas de productos cambiantes y que demandan una línea de negocio y de producción que no sea estática y que requiere de continuos cambios (diseño para la manufactura). Una de las necesidades actuales es la generación de procesos flexibles para empresas de rápido crecimiento, tipo *spin-off*. El objetivo de este proyecto fue el escalamiento industrial de los procesos para una línea empresarial, de la cual solo se contaba con una estructura en laboratorio y que considera tres productos diferentes con un mismo esquema de diseño. La metodología partió de un lienzo de negocios, la estructuración de los procesos, la medición del escalamiento industrial y la interacción requerida para cada proceso. Como resultado, se pudo obtener una propuesta de modelo de negocio que, a partir del escalamiento de los procesos, identifica las necesidades de la organización en cuanto a equipos, personal, locación e insumos. Se concluye que la estructura por procesos, con una mirada de enfoque sistémico para una organización, también puede aplicarse en empresas de rápido crecimiento.

Palabras clave: diseño para la manufactura, escalamiento, flexibilidad, modelo de negocio, procesos, *spin-off*.

Introducción



La industria del conocimiento, circunscrita en la generación de nuevas investigaciones y en el desarrollo tecnológico mundial, es un indicador en crecimiento constante. Como motor de industrialización, se ha visto un incremento en el número de empresas cuya base es el conocimiento, las cuales, principalmente, tienen la estructura de *spin-offs* [1]. Tal como se establece en la Ley 1838 de 2017 (de *spin-off* en Colombia): «Las *spin-offs* son empresas basadas en nuevos conocimientos, encargadas de transformar los resultados de investigación, desarrollo tecnológico e innovación gestados en las universidades, en productos y servicios para llevar al mercado con independencia jurídica, técnica y comercial» [2].

Estas empresas se enfocan en la creación de desarrollos científicos con potencial de protección mediante propiedad intelectual, abarcando productos, procesos, métodos, *software* y conocimientos. En sus primeras fases, estos avances generalmente se llevan a cabo en entornos de laboratorio. Sin embargo, para poder ser competitivos y generar el recurso necesario, así como las unidades que se requieren, se precisa la estructuración de procesos flexibles para esta industria de rápido crecimiento y lograr un escalamiento que pueda llevar del laboratorio a la industria [3], [4].

Es desde esta necesidad que este proyecto, adoptando la gestión, control y organización de procesos, pretende generar una propuesta organizacional que pueda llevarse a escala industrial para la producción de mobiliario urbano para la construcción sostenible, partiendo de una línea de producción que considera tres productos diferentes con un mismo esquema de diseño, que requieren ajustes mínimos en su línea de ensamble.

5.2.1 Preliminares conceptuales

5.2.1 Spin-offs

En la revolución del mundo de los negocios, se presentan nuevas empresas que intentan permanecer en el mercado con el propósito de generar valor agregado frente a las necesidades que se dictan diariamente en una dinámica de mundo cambiante. Un tipo de empresas que ha tomado fuerza recientemente son las *start-ups*, las cuales se caracterizan por ser una organización temporal, que se encuentra en busca de un modelo de negocio que le permita adaptarse a sus necesidades y las del mercado; puede ser escalable, lo que se define como «la capacidad o habilidad que tienen las empresas de mantener el desempeño que su modelo

de negocio ha generado, e incluso superarlo, y se obtiene un buen rendimiento como organización» [5].

Según este crecimiento, se observa la oportunidad de generar empresa a partir de conocimientos derivados de procesos I+D+i y que tienen su nacimiento en la academia, principalmente en universidades. Las *spin-offs* son empresas que basan su modelo de negocios en la generación de nuevos conocimientos y se encargan de transformar los resultados de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, gestados en las universidades, en productos y servicios para llevar al mercado con independencia jurídica, técnica y comercial. [2]

Tanto las *spin-offs* como las *start-ups* son empresas de base tecnológica. Su gran diferencia radica en que una *spin-off* nace de una institución dedicada a la investigación y la institución participa como accionista en la nueva compañía, mientras que una *start-up*, aunque también tiene licencia de tecnología, no es accionista y el vínculo del emprendedor con ella es inexistente o muy bajo [6].

En el contexto mundial, con este nuevo esquema de negocio, las instituciones de educación superior visualizan una oportunidad de generación de nuevos mercados a partir de la puesta en marcha de modelos de negocio que parten de los resultados de investigación y el desarrollo tecnológico generados por los profesores y estudiantes. Para apalancar este proceso, en Colombia se genera la Ley 1838 de 2017: «Por la cual se dictan normas de fomento a la ciencia, tecnología e innovación mediante la creación de empresas de base tecnológica (*spin offs*) y se dictan otras disposiciones» [2], y de esta forma se presenta una oportunidad para las IES colombianas.

5.2.2 Flexibilización de procesos

Proceso

La norma ISO 9001-2015 establece que un proceso es un conjunto de actividades que se relacionan e interactúan con el propósito de transformar unas entradas (materia, energía, información) en salidas (materia, energía, información). Véase la figura 5.1. Estos elementos tienen la intervención de todas o algunas de las partes interesadas y su resultado se enfoca en dar cumplimiento a las necesidades de los clientes [7].

Figura 5.1. Cumplimiento necesidades de los clientes



Fuente: elaboración propia.

Otros autores plantean las siguientes definiciones:

- «Conjunto de actividades de valor agregado interconectadas, cuyo propósito es convertir un insumo en un producto, ya sea un bien o un servicio» [8].
- «Grupo de actividades interconectadas que, a través de su interacción, convierten insumos en productos o resultados» [9].
- «Serie de acciones consecutivas que incorporan valor en la generación de un producto o servicio a partir de diversas operaciones» [10].

Un proceso consiste en una disposición estructurada de recursos como personas, materiales, energía, equipos y métodos, con el propósito de ejecutar actividades que conduzcan a un resultado final definido. Para su gestión efectiva, debe contar con entradas y salidas cuantificables, además de la capacidad de ajustarse según sea necesario. [10]

La estructura por procesos permite integrar las acciones y personas que participan en toda la cadena de valor de la organización, ayudando a entender la globalidad de la tarea que desempeña cada actor. «La visión de procesos permite salir de la absurda orientación sólo funcional, donde las personas dicen: “no es mi responsabilidad”, cuando creen haber hecho bien su tarea, pero el proceso no funcionó» [11].

Un proceso se fundamenta en varias etapas antes de su ejecución y evaluación, tal como lo define [12]. Esta es la fase de planeación, que es la que se encarga de orientar los pasos y acciones que se van a seguir en el proceso y que define el indicador de este. Adicionalmente, se construyen las condiciones para que el proceso se oriente de forma adecuada y se visualizan los eventuales riesgos inherentes a su ejecución. La organización incluye

el cómo se ordenarán los recursos para poder cumplir con las metas y asignaciones propuestas en el proceso y el control, que consiste en evaluar y realizar correcciones a todas las acciones que están determinadas en el proceso productivo [12].

Dentro de un proceso se llevan a cabo actividades, entendidas como la combinación de diversas tareas organizadas en un procedimiento para optimizar su gestión. La disposición estructurada de estas actividades puede originar un subproceso o un proceso cuyo resultado final es un producto destinado al cliente [13].

Se puede definir que un proceso lo es si: 1. Tiene secuencias de actividades. 2. Tiene enmarcado un ciclo de mejora continua en su ejecución (Planear-Hacer-Verificar-Actuar). 3. Se tienen definidas las entradas y salidas. 4. Tiene un responsable. 5. Tiene la capacidad de cruzar vertical y horizontalmente la organización [7].

Dentro de un sistema, los procesos presentan ciertas características clave: comienzan con insumos que, por medio de actividades, se transforman en valor agregado. Su desarrollo implica una serie de acciones orientadas a cumplir con las necesidades y expectativas del cliente. Además, tienen un inicio y un cierre definidos, marcados por eventos específicos. La ubicación de cada paso dentro del proceso es fundamental, lo que resalta la importancia de mantener una secuencia estructurada [14].

En un proceso intervienen varios actores. En primera instancia se encuentran los proveedores, que son quienes suministran los materiales e información que se requieren de entradas de acuerdo con los requisitos. En una segunda instancia aparecen los responsables del proceso o producto, quienes contribuyen con su labor en diversas actividades para garantizar que el producto o servicio final cumpla con los estándares definidos. En tercera instancia están los clientes o destinatarios finales de proceso, que

son los que juzgan la calidad, en la medida en que el producto satisfaga sus necesidades.

Estos actores generan diversos tipos de relación en la ejecución de proceso, por medio de las unidades o grupos de trabajo que intervienen en este [15].

En la estructura de los sistemas de gestión, se tiene un pensamiento sistémico en el cual todos los procesos interactúan y su funcionamiento impacta de forma directa o indirecta a los demás procesos dentro de la organización. Para que una organización incorpore un enfoque basado en procesos dentro de su sistema de gestión de calidad, es fundamental seguir cuatro etapas clave:

1. Identificar y establecer la secuencia de los procesos.
2. Describir detalladamente cada proceso.
3. Realizar seguimiento y medición para evaluar los resultados obtenidos.
4. Poner en práctica mejoras basadas en los datos recolectados durante el seguimiento y la medición [15].

Flexibilidad

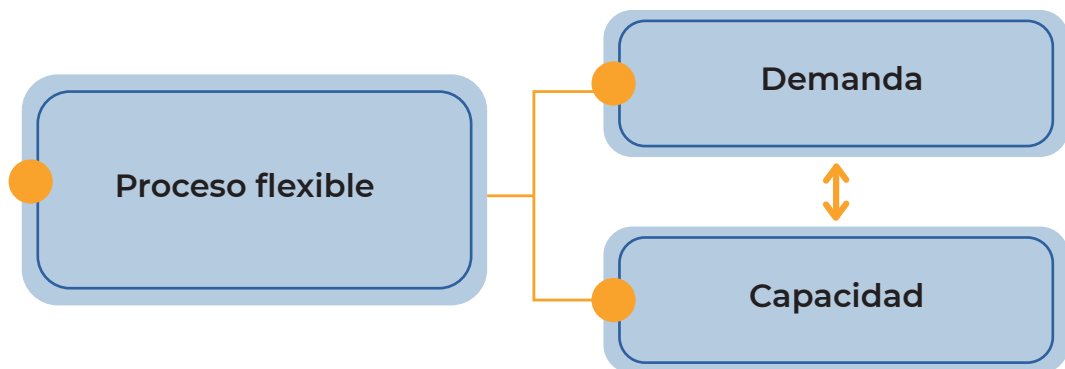
Es la capacidad de responder eficazmente a las circunstancias cambiantes; un proceso de fabricación es más flexible que otro si puede manejar una gama más amplia de posibilidades. Cuanto menos tiempo y costo se necesite para adoptar una alternativa, mayor será la flexibilidad [16].

La necesidad de flexibilidad se basa en la de hacer frente a la incertidumbre en el entorno de fabricación [17].

La flexibilidad del proceso se da cuando en una instalación de producción se pueden fabricar múltiples productos; este elemento es una consideración crítica en los sistemas de producción de múltiples productos que enfrentan una demanda incierta. El desafío de la flexibilidad es determinar una configuración rentable que pueda satisfacer la demanda con alta probabilidad [18].

Aumentamos la flexibilidad de un proceso cuando agregamos diferentes productos, enlazados a la misma cadena productiva de uno que se tiene como referente. Para un subconjunto de productos Z , agregar enlaces a los procesos aumenta la capacidad disponible para el subconjunto Z y disminuye la probabilidad de que no se pueda satisfacer la demanda del subconjunto Z [19]. Véase la figura 5.2.

Figura 5.2. Elementos procesos flexibles



Fuente: elaboración propia.

Tener un proceso flexible puede ser complejo debido a que, cuando aumentan los productos, aumentan la demanda y la capacidad de los procesos, es decir, se genera un crecimiento exponencial de estos [20], lo que sucede por diferentes razones.

- Las ventas y los beneficios pueden ser difíciles de calcular debido a la flexibilidad que se puede presentar en ellos.

a generar adecuaciones en los procesos, teniendo presentes los recursos que se necesitan para operar [22].

La identificación del proceso permite enlazar las necesidades de los clientes con los requerimientos a los proveedores para la puesta en marcha del proceso productivo. La ventaja competitiva moderna se mide en términos de flexibilidad de los procesos; esto implica cambiar de manera continua [23]. Identificar estos procesos desde los laboratorios logra proyectar los posibles cambios en el futuro y tener el control de estos procesos de manera adecuada para que el escalamiento sea desarrollado con éxito en nuestras empresas.

5.2.3 Diseño para la manufactura y el ensamble

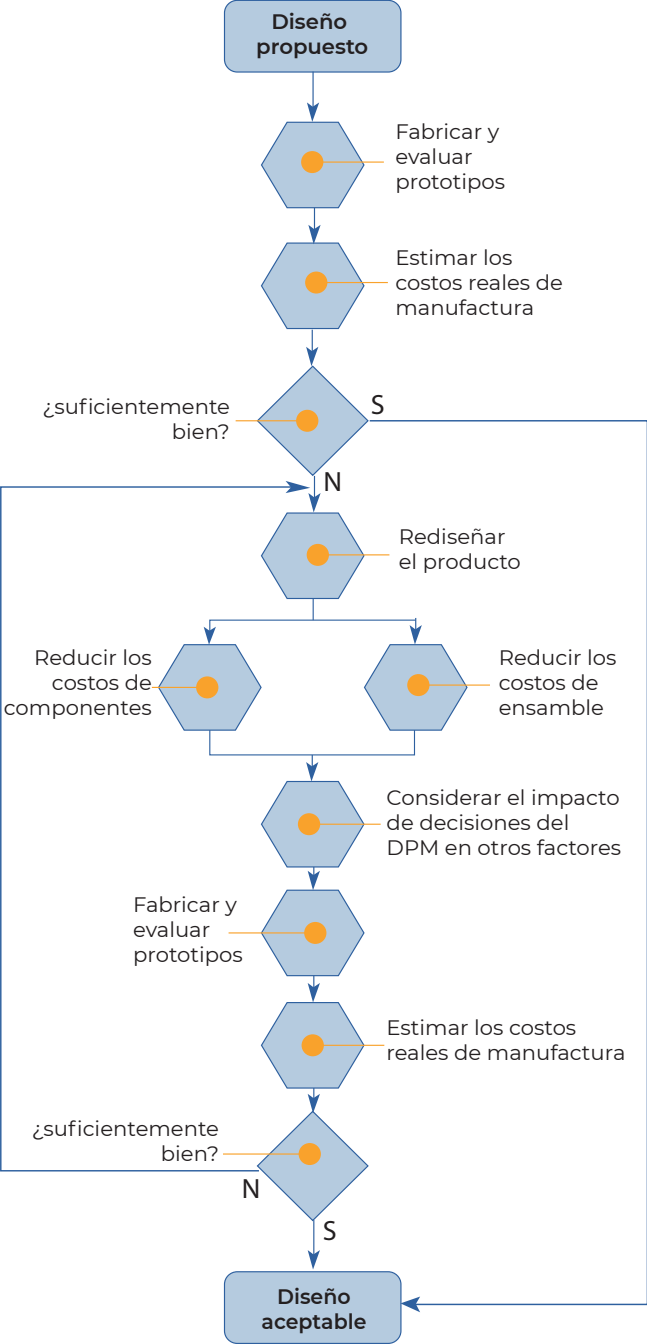
Diseño para la manufactura y el ensamble (DFMA) es un conjunto de procesos metódicos de diseño que pueden ser aplicados en diversas etapas del proceso de desarrollo de productos. El diseño para la manufactura (DFM) implica la reducción del número de partes que un producto pueda contener, mientras el diseño para el ensamble (DFA) involucra la aplicación de modelos de tiempos de montaje y modelos complejos mediante reglas básicas basadas en estudios simplificados o estudios de ingeniería industrial de tiempo y movimientos [24].

Los beneficios de incluir métodos de DFMA en procesos de desarrollo de producto son la reducción de costos, la fiabilidad e incrementar la calidad. Si el diseño del producto es fácil de producir y ensamblar, puede producirse en menos tiempo, por lo tanto, es más barato. Otro impacto benéfico radica en la simplificación de procesos que reduce errores absolutos.

Las especificaciones de diseño son elementos clave para el desarrollo del concepto de un producto; sin embargo, en etapas

finally, integration difficulties between the proposed design and the established specifications. In figure 5.4, the design method for manufacturing is illustrated.

Figura 5.4. Método de diseño para la manufactura (DFMA)



Fuente: elaboración propia.

5.3 Metodología

La metodología utilizada trabaja elementos cualitativos y cuantitativos. Desde el enfoque cuantitativo se efectuarán las actividades de medición económica de la tecnología que se está estudiando y se recolectarán datos, usando instrumentos como encuestas e información de los procesos involucrados. Desde el enfoque cualitativo, se desarrollan actividades para definir la propuesta de valor de la empresa. Se recopiló información utilizando el lienzo de negocios, se elaboraron matrices para estructurar los procesos y se llevaron a cabo un análisis de datos para identificar los elementos clave por considerar en el estudio.

Esta sección expone la metodología empleada para lograr los objetivos establecidos. Para esto, se detallan las fases del proceso y su respectiva descripción. La figura 5.5 presenta un resumen de la propuesta metodológica.

Figura 5.5. Metodología de procesos flexibles para escalar productos de un laboratorio



Fuente: elaboración propia.

5.3.1 Lienzo de negocios

El lienzo de modelo de negocio es una herramienta visual en la que se pueden representar los elementos estratégicos fundamentales de un modelo empresarial. En esencia, ofrece una visión integral y detallada sobre su operatividad, clientes, fuentes de ingresos y otros aspectos clave [26].

Estos lienzos no solo brindan una visión general del modelo de negocio, sino que también facilitan su análisis y evaluación estratégica. Permiten a las empresas adaptar su modelo a medida que evolucionan, considerando factores como cambios en el mercado, tendencias emergentes o procesos de expansión [27].

Se trata de un esquema que establece la estructura del negocio, mostrando la interacción entre sus distintas secciones. Para lograr un análisis integral, es fundamental considerar de manera conjunta la propuesta de valor, el público objetivo y los canales de interacción, en lugar de abordarlos de forma aislada.

5.3.2 Estructuración de los procesos

Caracterización del flujo de trabajo con base en la estructura desarrollada en el laboratorio. Aquí se deben identificar los recursos y la tecnología que se requieren y se debe dar muestra de la flexibilidad del proceso por escalar. Se utilizan diferentes técnicas para la construcción del flujo; este debe ser gráfico, de tal forma que permita el entendimiento desde el laboratorio y la industria.

La estructura de flujo del proceso utilizada para fabricar un producto afecta el diseño de las instalaciones, los recursos, las decisiones tecnológicas y los métodos de trabajo. La arquitectura de procesos puede ser un componente importante en la estrategia de la empresa para construir una ventaja competitiva [28].

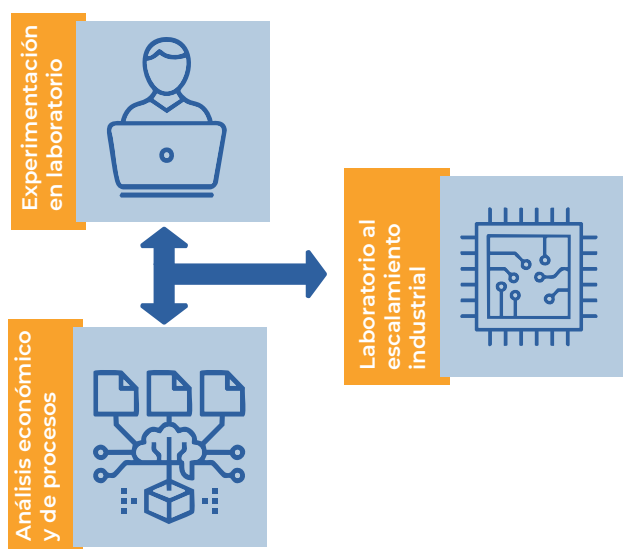
5.3.3 Interacción requerida para cada proceso

En esta fase, teniendo presente la estructuración del flujo obtenido en la inmediatamente anterior, se deben caracterizar todos los elementos de proceso, esto con relación a la inversión y los activos requeridos, para qué productos dentro del proceso flexible se requiere y una descripción detallada de cada uno de los elementos por considerar en este.

5.3.4 Medición del escalamiento

Una vez se identifican los procesos flexibles en el laboratorio, se realiza un análisis económico y de procesos para pasar del laboratorio al escalamiento industrial. Aquí consideramos el diagrama de procesos de la tecnología que se está trabajando para identificar claramente cómo está desarrollado el proceso, la caracterización e interacción requeridas y, con esta información, se proyecta el negocio que queremos establecer para hallar su medición y analizar su rentabilidad (véase la figura 5.6).

Figura. 5.6. Procesos flexibles para escalar productos de laboratorio



Fuente: elaboración propia.

5.4 Resultados

5.4.1 Lienzo de negocios

En este punto se estructura el lienzo de negocios (véase la tabla 5.1); para este se toman elementos como la oportunidad que se tiene en el medio para la elaboración de productos flexibles y se definen los clientes potenciales que se tienen en el medio.

Actualmente, brindan soluciones similares a los productos analizados. Por otro lado, se estructura una propuesta de valor inicial y las soluciones que brinda la tecnología en estudio. Se definen los canales, relacionamiento e ingresos que se perciben por la tecnología proyectada. Además, se definen los recursos y alianza y, por último, se desarrolla la estructura de costos.

Tabla 5.1. Lienzo de negocios

Oportunidad				
El mercado busca productos verdes con menor impacto. Se está buscando productos para la construcción que sean sostenibles y con un impacto ambiental menor. Existe una necesidad de las industrias en darles valor agregado a los residuos que se generan.				
Actividades	Soluciones actuales	Propuesta de valor	Relacionamiento	Recursos
Actividades de producción (diseño, industrialización de la planta, prototipado, estandarización del proceso productivo).	Uso de RCD en el desarrollo de productos, proyectos de construcción sostenible. Diseños personalizados.	Menor huella ecológica a partir de la producción y reúso de residuos industriales y agroindustriales para el desarrollo de nuevos productos.	Asesoría personalizada para el desarrollo de proyectos a la medida. Oportunidad en el desarrollo del proyecto.	Recursos humanos: profesionales con conocimiento en materiales, sector de la construcción, diseñadores industriales, gestión de operaciones y cadenas de suministro, administradores, comerciales.
	Cientes Empresas de construcción, arquitectos y diseñadores industriales, entes gubernamentales.		Canales Catálogo virtual Plataforma web Contacto físico con clientes Venta directa	

Continúa...

Estructura de costos		Fuentes de ingresos	
Cotos de montaje de operación. Costo de mano de obra.	Materiales Transporte y logística Almacenamiento	Gastos de administración y ventas	Venta de productos para la construcción. Venta de servicios de valorización de residuos. Venta de diseños y especificaciones para proyectos
Solución	Ventaja única	Alianzas	
Productos para la construcción y mobiliario urbano sostenible.	Capacidad de valorizar residuos en un mismo proceso.	Centros de innovación y desarrollo tecnológico. Laboratorios en el área de construcción. Empresas generadoras de desechos.	

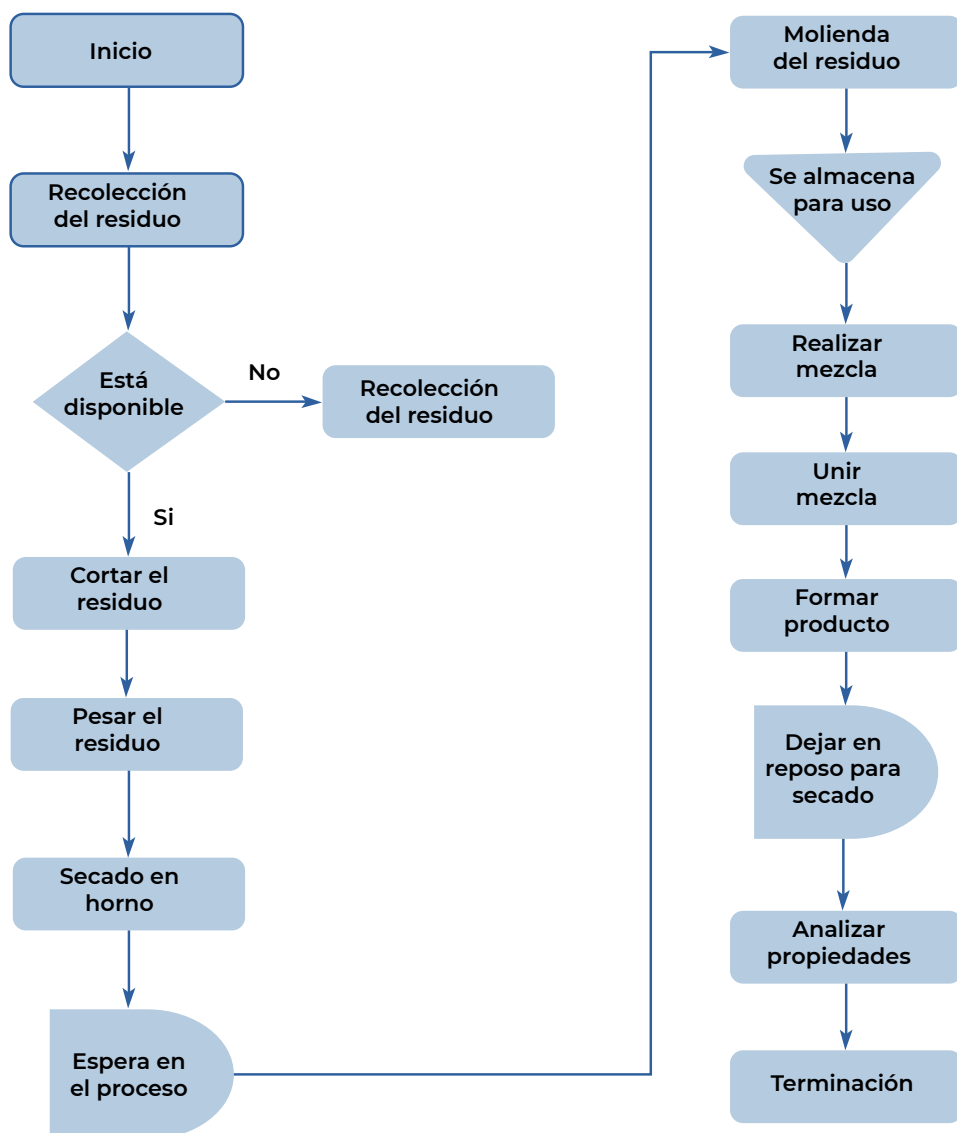
Fuente: elaboración propia.

5.4.2 Estructuración de los procesos

En este punto se identifica la estructura del flujo de proceso que se desarrolla en el laboratorio para escalarla hasta el nivel industrial. El flujo de proceso (véase la figura 5.7) permite identificar la distribución de las instalaciones, los recursos que se requieren, las decisiones de tecnología que se utilizarán y los métodos de trabajo por emplear. Este trabajo debe adelantarse en conjunto con todos los investigadores involucrados en el trabajo en el laboratorio, con el fin de garantizar la estructura del flujo de proceso.



Figura. 5.7. Procesos flexibles de productos



Fuente: elaboración propia.

5.4.3 Interacción requerida para cada proceso

En la tabla 5.2 se puede evidenciar cómo cada uno de los procesos estructurados en el diagrama de flujo presenta un análisis particular en el que se puede identificar una descripción del proceso, las actividades precedentes a este, los activos que se

requieren para desarrollar la actividad, la clasificación de este en el proceso, si tiene una subcategoría, para cuál de los productos del proceso flexible aplica y una descripción de los activos requeridos para el desarrollo de este en la escala industrial.

Tabla 5.2. Caracterización del escalamiento

Caracterización						
Descripción	Actividad precedente	Activo	Clasificación	Subclasificación	Producto	Descripción del activo
El operario realiza el proceso de secado del residuo, acorde con la orden de servicio del producto que se va a elaborar.	7. Selección y pesaje del residuo	Horno de secado	Inversión	Maquinaria	Todos	Horno universal de secado - Convección natural estufa universal, circulación de aire natural.
		Montacarga manual - carreta (1)	Inversión	Maquinaria	Todos	Montacarga con facilidad para las ejecuciones del proceso de producción y carreta para el desplazamiento de materias primas.
		Estanterías para almacenamiento	Inversión	Maquinaria	Todos	Estantería metal/madera sin tornillos 176 x 75 x 40 cm, 4 niveles grises.
El operario realiza el proceso de selección del residuo, acorde con la orden de servicio del producto que se va a elaborar.	6. Se descarga la materia prima por el personal de apoyo	Báscula (1)	Inversión	Maquinaria	Todos	Báscula balanza digital brazo 350 kg + gamera 5000 gr.
		Mesa de concreto	Inversión	Edificación-Infraestructura	Todos	Mesa de concreto para trabajo en el proceso productivo.

Fuente: elaboración propia.

El proceso de caracterización es permanente y se realiza con el grupo de investigadores para validar las necesidades tanto en el laboratorio como en el ámbito industrial.

5.4.4 Medición del escalamiento

La tabla 5.3 muestra el valor económico del escalamiento industrial para un proceso flexible. Esta proyección se realizó a cinco años y se puede apreciar que en el proceso cada año tiene utilidades netas a favor y se observa que, en el tercer año, el proyecto tiene un aumento del 35 % con relación a los dos primeros años. Lo que permite que el proyecto se consolide y económicamente sea más rentable.

Tabla 5.3. Valor económico

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	∞
Ingreso	\$691.200.000	\$732.672.000	\$879.104.640	\$914.268.826	\$950.839.579	\$984.118.964
Costos variables	\$277.513.920	\$294.164.755	\$351.429.091	\$365.486.255	\$380.105.705	\$393.409.405
Costos fijos	\$332.665.384	\$355.279.961	\$418.131.615	\$438.283.137	\$459.412.032	\$481.157.626
Ebitda	\$81.020.696	\$83.227.283	\$109.543.934	\$110.499.434	\$111.321.841	\$109.551.934
Depreciaciones	\$8.595.391	\$8.595.391	\$8.595.391	\$8.595.391	\$8.595.391	\$8.595.391
Utilidad operativa	\$72.425.304	\$74.631.892	\$100.948.542	\$101.904.043	\$102.726.450	\$100.956.542
Impuesto	\$25.348.857	\$26.121.162	\$35.331.990	\$33.628.334	\$33.899.729	\$33.315.659
Utilidad neta	\$47.076.448	\$48.510.730	\$65.616.553	\$68.275.709	\$68.826.722	\$67.640.883

Fuente: elaboración propia.

5.5 Conclusiones

En este trabajo se presenta el escalamiento industrial de los procesos para una línea empresarial, de la cual solo se contaba con una estructura en laboratorio y que considera tres productos diferentes en un mismo esquema de diseño. Esta línea empresarial es concebida de manera que permita incorporar futuros productos a la cadena productiva, con el fin de flexibilizar el proceso. Se presenta el lienzo de negocio como elemento inicial para realizar el escalamiento desde el laboratorio hasta la industria, se realiza un diagrama de ensamble estructurado para analizar cada una de las etapas del proceso y se termina con la caracterización económica de este.

El lienzo de negocios presenta los principales retos que como empresa se deben asumir. Se identifican nuestros clientes potenciales y el relacionamiento en el futuro; nos habla de nuestra propuesta de valor para el desarrollo del escalamiento de la tecnología en el ámbito industrial.

La estructuración de procesos desde una línea de producción en laboratorio valida el flujo de ingresos en el futuro y la oportunidad de un escalamiento industrial.

La caracterización de procesos de forma adecuada identifica los costos asociados y la maquinaria y equipos que son necesarios para un proceso y, de esta forma, permite el escalamiento industrial. Trabajar procesos flexibles establece la gama de productos que se pueden asociar al trabajo industrial desde el laboratorio y hace la proyección de estos para identificar el costo que implica el montaje de procesos de alto nivel. Igualmente, los costos proyectan la viabilidad del modelo utilizado para el escalamiento industrial.

Adoptar el diseño para la manufactura en proceso de desarrollo de producto facilita la ubicación de puntos críticos, de manera que se logra una mejor utilización de los recursos y evita errores que pueden resultar en el incremento de los costos.

Un desarrollo adecuado de procesos flexibles y su respectiva caracterización identifican de manera adecuada los costos y la proyección económica del escalamiento de productos desarrollados en laboratorio a productos en el ámbito industrial. Esta proyección valida si este proceso es rentable en los próximos años.

La línea de procesos que se desarrollan en laboratorio tiene un gran potencial para generar *startups* o *spin-offs* y ampliar las líneas de negocio que pueden generarse desde el país.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses de índole comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

La presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno, la sociedad o el medioambiente.

Referencias

- [1] F. Machuca-Martínez y D. F. Manotas, *Empresas de base tecnológica y spin-off, necesidad de valorar tecnologías*, 2018.
- [2] Congreso de Colombia, *Ley 1838 de 2017 - "Por la cual se dictan normas de fomento a la ciencia, tecnología e innovación mediante la creación de empresas de base tecnológica (spin offs) y se dictan otras disposiciones"*, Bogotá, 2017.
- [3] A. Benedetto, *De la innovación al escalamiento: reflexiones a partir de dos procesos de innovación local*, 2013.
- [4] H. Echezuría, "El escalamiento en los procesos de investigación aplicada: caso para la US patent 6491100," *Tekhné*, 2018.
- [5] A. Jabłoński, "Scalability of sustainable business models in hybrid organizations," *Sustainability*, vol. 8, no. 3, p. 194, 2016.
- [6] J. L. Falcó, "De la idea al negocio: cómo crear una 'spin off' o 'startup'," *Génesis Biomed*, Mar. 11, 2020. [Online]. Available: <https://genesis-biomed.com/es/de-la-idea-al-negocio-como-crear-una-spin-off-o-startup/>
- [7] International Standard Organization, *ISO 9001 - Sistemas de gestión de la calidad requisitos*, Geneva, 2015.
- [8] R. Y. Chang, *Mejora continua de procesos: Guía práctica para mejorar procesos y lograr resultados medibles*. Bogotá: Grupo Editorial Norma, 1996.
- [9] International Organization for Standardization, *ISO 9000:2005(es) Sistemas de gestión de la calidad – Fundamentos y vocabulario*, Geneva, 2005.
- [10] European Foundation for Quality Management, *Evaluar la Excelencia. Guía práctica para la autoevaluación*. Madrid, 1999.
- [11] J. Bravo Carrasco, *Gestión de procesos*. Santiago de Chile: Evolución SA, 2011.
- [12] Y. Marín Álvarez y M. Marín Ramírez, *Procesos productivos y administrativos*. Textos Académicos, 2009.
- [13] M. Á. Mallar, "La gestión por procesos: un enfoque de gestión eficiente," *Visión de Futuro*, vol. 13, no. 11, pp. 1–23, 2010.
- [14] M. G. Blandez Ricalde, *Proceso administrativo*. Editorial digital UNID, 2016.
- [15] J. J. Gilli, Á. Arostegui, I. Doval, A. Lesulauro y D. Schulman, *Diseño organizativo: estructura y procesos*. Ediciones Granica, 2013.

- [16] T. Zuzul and M. Tripsas, "Start-up inertia versus flexibility: The role of founder identity in a nascent industry," *Adm. Sci. Q.*, vol. 65, no. 2, pp. 395–433, 2020.
- [17] U. K. Bamel and N. Bamel, "Organizational resources, KM process capability and strategic flexibility: a dynamic resource-capability perspective," *J. Knowl. Manag.*, 2018.
- [18] H. Fatorachian and H. Kazemi, "A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework," *Prod. Plan. Control*, vol. 29, no. 8, pp. 633–644, 2018.
- [19] A. B. Frare and I. M. Beuren, "Fostering individual creativity in startups: Comprehensive performance measurement systems, role clarity and strategic flexibility," *Eur. Bus. Rev.*, vol. 33, no. 6, pp. 869–891, 2021.
- [20] D. Mourtzis, "Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 7, pp. 1927–1949, 2020.
- [21] K. Zia, A. Ferscha, and D. Trendafilov, "Importance of coordination and cultural diversity for an efficient and flexible manufacturing system," *arXiv preprint arXiv:1905.08355*, 2019.
- [22] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, "Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems," *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, 2019.
- [23] Y. Koren, X. Gu, and W. Guo, "Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends," *Front. Mech. Eng.*, vol. 13, pp. 121–136, 2018.
- [24] K. N. Otto, *Product Design Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [26] S. Sparviero, "The case for a socially oriented business model canvas: The social enterprise model canvas," *J. Soc. Entrep.*, vol. 10, no. 2, pp. 232–251, 2019.
- [27] M. Carter and C. Carter, "The Creative Business Model Canvas," *Soc. Enterp. J.*, vol. 16, no. 2, pp. 141–158, 2020.
- [28] Q. Li and Y.-L. Chen, "Data flow diagram," in *Modeling and Analysis of Enterprise and Information Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 85–97.



Capítulo 06

Herramienta digital para la toma de decisiones multicriterio en el control de productos y servicios suministrados externamente en pymes de Medellín

Digital Tool to Multicriteria Decision Making in the Control of Externally Supplied Products and Services in SME from Medellin City

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.06>

Fernando Alberto Cardona-Arango ¹

Diana M. Montoya-Quintero ²

Javier Iván Hernández-Montoya ³

¹ Magister en Gestión de las Organizaciones, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-3873-5325, correo electrónico fercard10@yahoo.es

² Docente investigadora, Grupo CM&P, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-0761-4067, correo electrónico dianamontoya@itm.edu.co

³ Docente ocasional, línea de Investigación en Calidad, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0001-6487-3175, correo electrónico javierhernandez@itm.edu.co

Resumen. En este documento se realiza una propuesta metodológica a partir de herramientas multicriterio para apoyar la toma de decisiones en el marco del Control de Procesos, Productos y Servicios suministrados externamente en pequeñas empresas de Medellín. En la evaluación y reevaluación de proveedores externos dentro de una organización, es relevante la consideración de múltiples criterios cuantitativos y cualitativos, que permitan tomar decisiones en términos de la selección de estos, así como de los aspectos que se deben tener en cuenta para realizar acciones de mejoramiento continuo del proceso y en consecuencia para contribuir al logro de la satisfacción del cliente. Para el diseño de la herramienta metodológica desarrollada se utiliza un enfoque cualitativo y cuantitativo a partir de los principios de los métodos Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y Proceso Analítico en Red (ANP), analizando un contexto específico en pequeñas empresas (pymes) de Medellín - Colombia, y logrando un impacto funcional de orientar a los gerentes de las pymes a aplicar un marco de referencia orientado al control de productos y servicios de proveedores externos, que con una interfaz sencilla permite analizar tanto la priorización de proveedores como los aspectos que se deberían mejorar.

Palabras clave: control de procesos, gestión de proveedores, productos y servicios, toma de decisiones multicriterio.

Introducción



Este documento tiene como objeto mostrar los resultados obtenidos del diseño de una metodología soportada con una herramienta digital para gestionar el proceso de control de procesos, productos y servicios que suministran proveedores externos en pymes de Medellín, considerando múltiples criterios cuantitativos y cualitativos incorporados en métodos de análisis multicriterio para la selección, evaluación y desarrollo de estos.

El Plan de Desarrollo de Medellín muestra que menos del 20 % de las pequeñas y medianas empresas invierten en temas de innovación, resaltando la diferencia en este aspecto con grandes empresas (51 %) [1]. Las pymes, según el Plan de Desarrollo de Antioquia, generan la mitad de empleo en el departamento, lo que invita a observar una oportunidad de inversión para el

fortalecimiento del emprendimiento y el progreso económico dentro de la cuarta revolución industrial [2]. En este orden de ideas, los modelos para el análisis de toma de decisiones pueden emerger como herramientas de apoyo relevantes que contribuyan a afrontar los problemas complejos que enfrentan las organizaciones y, de modo más específico, en lo que se refiere al control de proveedores de productos y servicios de proveedores externos en las pymes de Medellín.

Para el desarrollo de la herramienta digital se tienen en cuenta los métodos Analytic Hierarchy Process (AHP) y Analytic Network Process (ANP). AHP es un método que descompone una situación no estructurada y compleja en elementos o partes según una estructura jerárquica [3]. Por su parte, el ANP es una extensión del AHP que considera relaciones de interdependencia y realimentación entre todos los grupos o las partes (clústeres) de la estructura, no de manera jerárquica, sino en red [4].

La herramienta digital que se propone en este escenario pretende orientar a los grupos de interés inmersos en el proceso de evaluación de proveedores, fortaleciendo la evaluación y la toma de decisiones inherentes para efectuarlas más rápida y eficientemente, por medio de un método estructurado y sistemático que considera múltiples criterios en la valoración o selección de proveedores externos, llegando a encontrar aspectos para la aplicación de correctivos, acciones correctivas o preventivas dentro de una cultura de mejoramiento continuo.

La herramienta desarrollada no genera un costo significativo por su utilización y es adaptable a Office, producto de usabilidad permanente en la población objetivo. En muchas ocasiones los gerentes de las pymes toman decisiones de forma subjetiva y por instinto, sin considerar documentos de Planeación Nacional, Planeación Departamental o Planeación Municipal que muestran

elementos de diagnóstico y posibles rutas de trabajo alineadas con herramientas de tecnologías de la información y la comunicación. De esto se observa la oportunidad del fortalecimiento de metodologías para la toma de decisiones en contextos organizacionales que en algunos casos se realizan de manera subjetiva y no estructurada [5].

6.2 Marco de referencia

6.2.1 Generalidades

En el documento se encuentra una serie de términos y características que son clasificados en este apartado para dar una mayor orientación al planteamiento del problema.

6.2.2 Pymes

Conforman parte del tejido social tanto nacional como regional, contribuyendo de manera significativa al desarrollo económico [6]. El marco normativo colombiano establece la concepción de tamaños empresariales en función de las actividades económicas ejercidas por personas naturales o jurídicas para el sector manufacturero, para el sector servicios y para el sector comercio, en áreas rurales o urbanas, según los ingresos por actividades ordinarias en el año [7], [8]. Lo anterior establece un contexto para la diferenciación entre microempresa, pequeña y mediana empresa, que implica la acreditación formal según esta categorización por parte de personas naturales o jurídicas.

6.2.3 Toma de decisiones

El hecho de tomar decisiones se concibe como un proceso cognitivo esencial en la vida humana; está presente desde aspectos

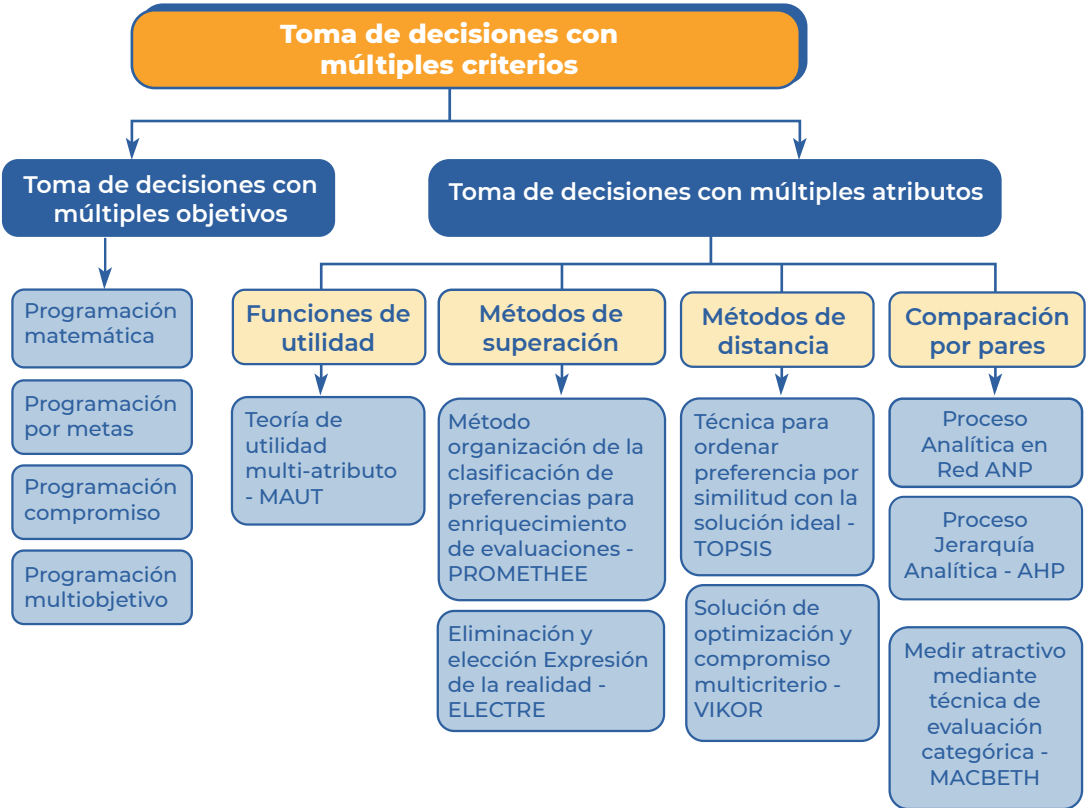
triviales hasta algunos de mayor complejidad, en contextos tanto personales como profesionales y de manera individual o colectiva. El estudio detallado de las técnicas y métodos de apoyo (en la toma de decisiones de manera formal) invita a los responsables de estos procesos a tener una visión sistemática y sistémica para examinar mecanismos que permitan abordar problemas mediante el análisis de información dirigido a objetivos específicos. Con el tiempo, debido a su aplicabilidad transversal, este concepto evolucionó en el ámbito organizacional con el enfoque de inteligencia de negocios, fortaleciendo los métodos para extracción, procesamiento y análisis de datos basados en información en contextos organizacionales.

En el ámbito empresarial, la toma de decisiones se vincula desde la alta dirección, que tiene la necesidad de diseñar y llevar a cabo estrategias para el mejoramiento continuo de los procesos empresariales [9]. Metodológicamente, esto implica la concepción y estructuración de procedimientos claros que estén armonizados con los recursos tecnológicos de la organización, con sus políticas y los conocimientos del personal en los diversos niveles de la estructura empresarial, de forma que en general se involucren fases del estudio como la identificando del problema, la evaluación alternativas viables y la obtención de conclusiones adaptadas al contexto particular [10].

La bibliografía especializada ofrece diversas aproximaciones para resolver estos desafíos decisionales, incluyendo árboles de decisión, la teoría bayesiana, criterios de valor esperado, herramientas multicriterio y multiobjetivo, métodos exactos y probabilísticos, así como técnicas de panel de expertos que facilitan la formulación de hipótesis precisas y la aplicación de herramientas apropiadas para el análisis de la información [11]. La figura 6.1 relaciona una propuesta de clasificación de métodos multicriterio de acuerdo

con la revisión de literatura realizada por [4], donde se parte del análisis de la teoría de decisión y se identifican métodos utilizados en ambientes de toma de decisión multiobjetivo y multiatributo.

Figura 6.1. Clasificación de metodologías multicriterio



Fuente: elaboración propia adaptada de [4].

6.2.4 Innovación en los procesos administrativos

Diversos autores sostienen que el proceso de innovación se origina en una conceptualización inicial, ya sea en forma de idea, producto o proceso productivo, que puede emerger desde cualquier unidad funcional de la organización. Durante la ejecución de actividades laborales dentro del entorno empresarial, los individuos identifican problemáticas, formulan soluciones potenciales, aplican dichas soluciones y, en caso de resultados

insatisfactorios, efectúan ajustes que introducen metodologías novedosas, propiciando el desarrollo de innovaciones. En múltiples situaciones, estas innovaciones se convierten sistemáticamente en fortalezas organizacionales que, posteriormente, se capitalizan y se integran como componentes estratégicos [12], [13].

Perspectivas más amplias sobre este fenómeno proponen que innovar constituye la transformación de oportunidades de mejora en valor, modificando procedimientos establecidos con el objetivo de mejorar resultados. Esta conceptualización resulta particularmente valiosa para desmitificar percepciones erróneas prevalentes en pequeñas y medianas empresas, tales como la presunción de que la innovación representa un fenómeno de naturaleza compleja y abstracta, que invariablemente surge del ámbito tecnológico, que se circunscribe exclusivamente al desarrollo de nuevos productos o servicios, o que debe constituir una aplicación sin precedentes. Dichas concepciones se han arraigado profundamente en el sector de las pymes, contribuyendo a la percepción de la innovación como un objetivo inalcanzable [6]. En el contexto contemporáneo, resulta inviable que una entidad empresarial alcance parámetros significativos de éxito sin la incorporación de tecnologías de información y comunicación, para la gestión efectiva de procesos innovadores [14].

6.2.5 Control de procesos, productos y servicios suministrados externamente

Según la norma técnica ISO 9001:2015, la organización tiene el deber de garantizar que los procesos, productos o servicios de proveedores externos estén de conformidad con los requisitos, así como de establecer los controles por establecer en estos procesos, particularmente «debe determinar y aplicar criterios para

la evaluación, la selección, el seguimiento del desempeño y la reevaluación de los proveedores externos» [15].

6.2.6 Analytic Hierarchy Process (AHP)

El creador del modelo AHP (proceso analítico jerárquico) [16], postula que la toma de decisiones constituye un acto inherente a la naturaleza humana, el cual requiere una estructuración sistemática de la información disponible. Dentro de este marco conceptual, el individuo debe considerar sus constructos axiológicos, sistemas de creencias y diversos recursos cognitivos para la determinación de soluciones. El modelo AHP, en este contexto, representa un instrumento metodológico que potencia significativamente el proceso decisorio, facilitando al decisor la contextualización dentro de un marco referencial específico, así como la identificación y priorización de alternativas eficientes que se evalúan considerando múltiples criterios [16].

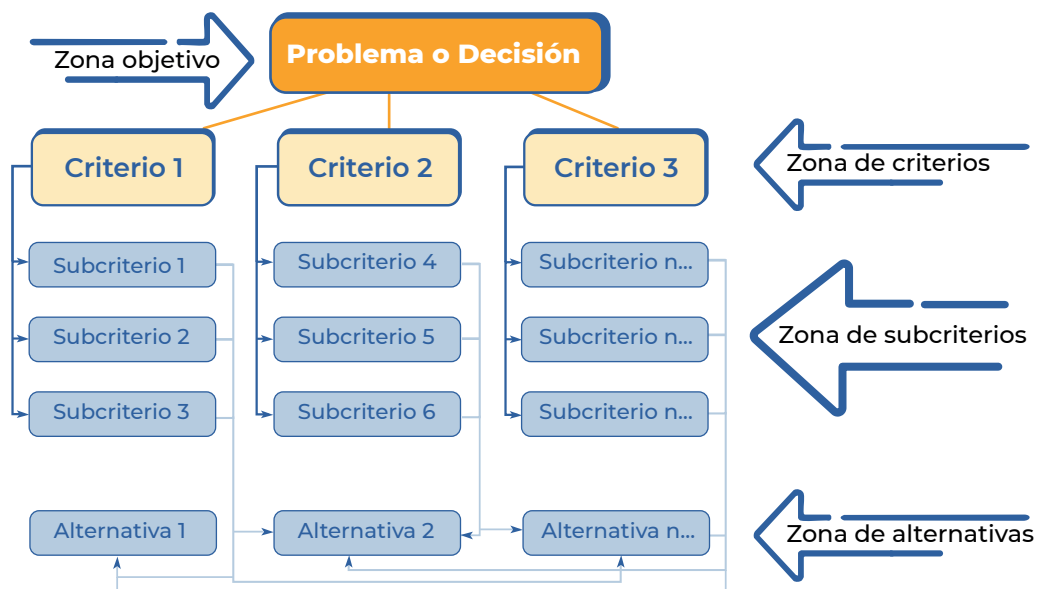
La adopción del modelo AHP para apoyar el proceso de evaluación multicriterio comprende las siguientes fases dentro de una estructura jerárquica [17]:

- **Objetivo.** Constituye el espacio donde se formulan la problemática o el dilema decisorio. La naturaleza temporal de los objetivos (corto, mediano o largo plazo) está supeditada a las características intrínsecas del problema, siendo imperativa su identificación y conceptualización precisa.
- **Criterios.** Comprende las dimensiones relevantes de evaluación o priorización que inciden significativamente en los objetivos formulados, incorporando variables de naturaleza tanto cualitativa como cuantitativa inherentes a la problemática. La formulación metodológicamente rigurosa de estos criterios repercute directamente en la calidad de las decisiones subsecuentes.

- **Subcriterios.** Delimita los atributos específicos de los criterios que contribuirán potencialmente a la resolución del problema o a la selección de la mejor alternativa. Esta fase también cumple la función de explicitar las ventajas diferenciales o propiedades distintivas de cada criterio y se utiliza cuando se quiere tener mayor detalle en un criterio que puede consolidar múltiples elementos.
- **Alternativas.** Engloba las propuestas factibles que garantizan la consecución de los objetivos preestablecidos.

La representación esquemática presentada en la figura 6.2 sintetiza la estructura jerárquica inherente al método AHP.

Figura 6.2. Clasificación de metodologías multicriterio



Fuente: elaboración propia adaptada de [18].

La tabla 6.1 muestra la escala de preferencias utilizada en los métodos AHP y ANP que se utiliza en el proceso de comparación por partes de manera reiterativa y en todos los niveles jerárquicos o de red.

Tabla 6.1. La escala fundamental de preferencias de Saaty

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
2	Débil o ligera	
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
4	Moderada mayor	
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen mucho a una actividad sobre otra.
6	Fuerte mayor	
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad se ve muy favorecida sobre otra; su dominio se demuestra en la práctica.
8	Muy, muy fuerte	
9	Importancia extrema	Las pruebas a favor de una actividad sobre otra son del mayor grado de afirmación posible.
Recíprocos de los anteriores	Si la actividad <i>i</i> tiene asignado uno de los números anteriores distintos de cero en comparación con la actividad <i>j</i> , entonces <i>j</i> tiene el valor recíproco en comparación con <i>i</i> .	Un supuesto razonable.

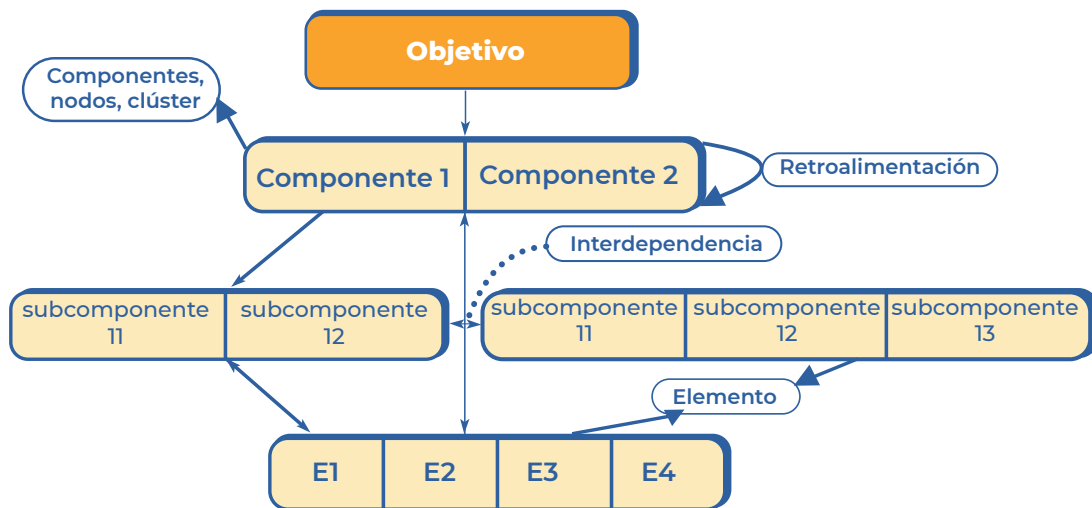
Fuente: elaboración propia adaptada de [18].

6.2.7 Analytic Network Process (ANP)

El ANP fue formulado por Thomas Saaty en 1996 como una extensión metodológica del AHP [3]. Este último estructura los elementos en niveles donde las interrelaciones siguen un patrón estrictamente jerárquico o cascada; por su parte, el ANP conceptualiza los elementos dentro de agrupaciones (clústeres) que permiten la existencia de interdependencias y retroalimentación, trascendiendo la rigidez de la estructura jerárquica convencional. Esta característica distintiva constituye su principal ventaja, puesto

que facilita la modelación de sistemas complejos con mayor fidelidad a las condiciones reales, permitiendo capturar las interrelaciones inherentes a numerosos fenómenos bajo estudio [19]. La figura 6.3 muestra la estructura de red adoptada en el método ANP, considerando componentes, nodos o clústeres, elementos, interdependencia y retroalimentación.

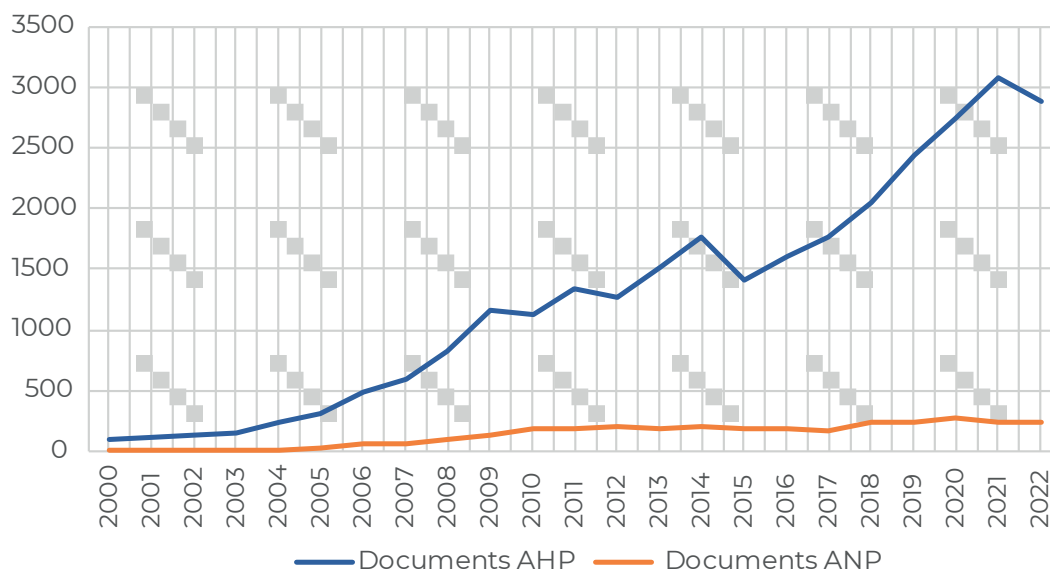
Figura 6.3. Estructura de red ANP



Fuente: elaboración propia a partir de [4].

Para efectos de análisis bibliométrico se estudiaron en Scopus las palabras clave *Analytic Hierarchy Process* y *Analytic Network Process* en la ventana de tiempo desde el 2000 al 2022, observando 29055 y 3110 documentos relacionados respectivamente, los detalles se pueden observar en la figura 6.4.

Figura 6.4. Comparativo de documentos Scopus 2000-2022



Fuente: elaboración a partir del visualizador de Scopus.

6.2.8 Descripción del estado actual

Los directivos de pequeñas y medianas empresas tienden a fundamentar sus procesos decisorios primordialmente en experiencias previas e intuición, prescindiendo de metodologías estructuradas basadas en modelos analíticos o herramientas tecnológicas que incorporen información relevante para soportar las decisiones. Esta situación obedece a la percepción de que tales aplicaciones representan una inversión no prioritaria dentro de su estructura operativa, privilegiando el conocimiento empírico adquirido mediante la praxis cotidiana. Se evidencia, consecuentemente, la imperativa necesidad de que los empresarios radicados en Medellín adquieran formación sistemática en fundamentos de administración, con el propósito de mejorar la gestión organizacional y mitigar los riesgos de insolvencia a los que las pymes se encuentran constantemente expuestas [20]. Algunos estudios han

permitido constatar que determinadas pymes en esta localidad operan basadas en paradigmas predominantemente emocionales, concibiendo la organización como un patrimonio hereditario o legado generacional [21].

Esta configuración constituye, en numerosos casos, un obstáculo significativo para la incorporación o aceptación de asesoría externa al núcleo familiar, manifestando deficiencias en la preparación para la formulación de decisiones estratégicas. Adicionalmente, esta circunstancia representa una limitante sustancial para el desarrollo y consolidación de la entidad empresarial en el mercado competitivo [22].

Se propone, en consecuencia, que las pymes desarrollen sistemas adaptados específicamente a sus requerimientos informativos, conducentes a perfeccionar los procesos decisorios en términos de oportunidad y eficacia [23]. Algunos resultados adversos se atribuyen a insuficiencias en la experiencia necesaria para la toma de decisiones críticas en el contexto empresarial, así como a la ausencia de incorporación de herramientas tecnológicas de apoyo que tomen como base hechos y datos de la organización. Esta situación puede presentarse debido a que en las pymes las decisiones frecuentemente recaen en un único individuo, generalmente el titular de la función gerencial, quien muchos casos concuerda con el propietario de la organización y que ejecuta algunas decisiones críticas de manera subjetiva en cortos períodos, sin estudio de la información relevante y sin procedimientos estructurados para materializar el procedimiento para toma de decisiones [24].

6.3 Metodología

Para la aplicación de la metodología de la investigación, se efectuó un estudio piloto con pymes establecidas en Medellín, aplicando los siguientes criterios: entidades que operan con capital propio o financiación externa, donde los colaboradores procuran su sustento económico por medio de la actividad empresarial y cuya estructura accionaria coincide con la propiedad, excluyendo organizaciones donde la gestión directiva se fundamenta en sucesión generacional.

Estos parámetros selectivos fueron establecidos con el propósito de homogeneizar las características de las unidades de análisis, facilitando así una exploración más profunda del fenómeno en estudio. Adicionalmente, se consideraron requisitos complementarios la formalización jurídica de las entidades, la existencia de procesos estratégicos que trasciendan la gestión exclusivamente familiar, así como la capacidad organizacional para emprender iniciativas y asumir riesgos, características que favorecen la viabilidad de procesos de gestión del cambio en el ámbito específico de selección o evaluación de proveedores externos. Consecuentemente, se seleccionó una muestra constituida por 30 pymes que cumplen los criterios establecidos para la investigación.

Para dar respuesta al proceso metodológico, se ejecutaron las siguientes fases:

Fase 1. Diagnóstico de los procesos decisorios en organizaciones seleccionadas. La recolección de datos se cumplió con entrevistas semiestructuradas [25].

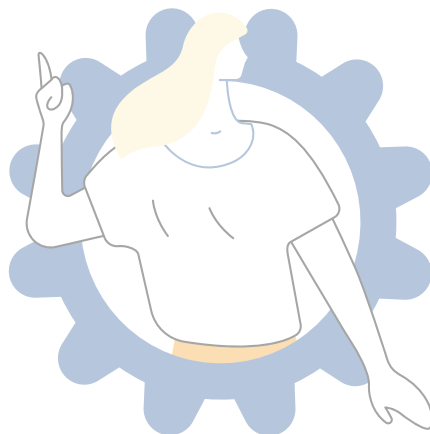
Fase 2. Caracterización sistemática de la información recopilada. Se diseñó y aplicó un instrumento cuantitativo tipo encuesta compuesto por 17 ítems, con el propósito de identificar variables significativas como metodologías y estrategias adoptadas, proce-

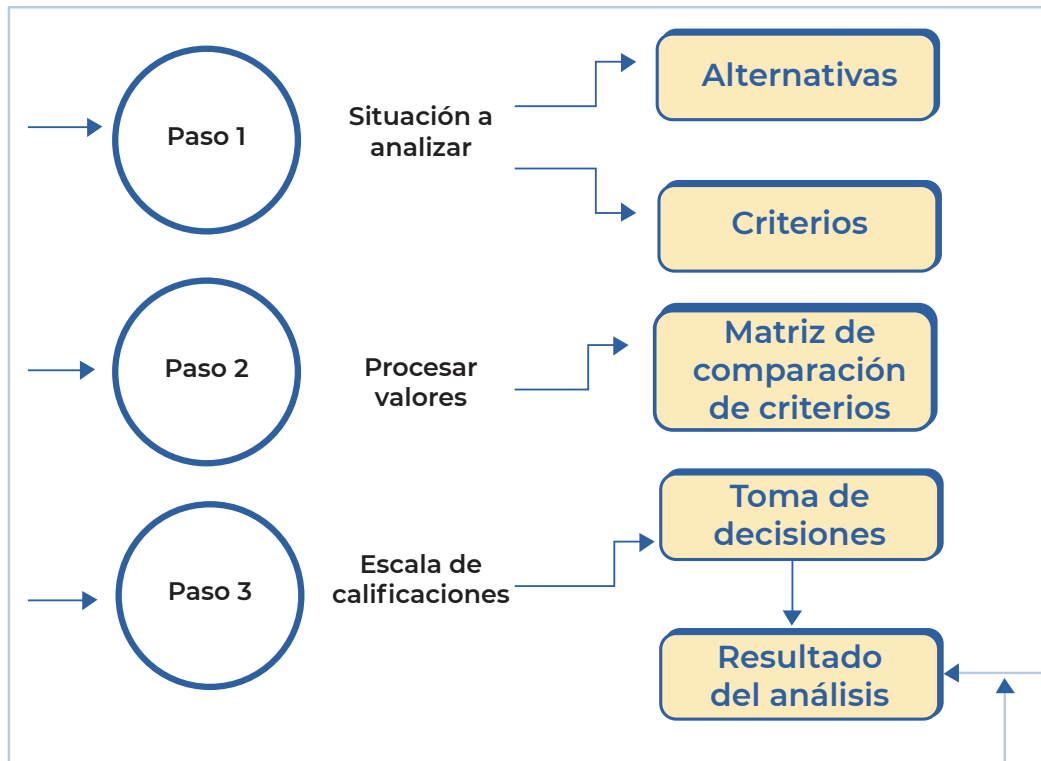
tos decisorios específicos de las pymes e impacto de dichos procesos en el desarrollo organizacional, entre otras dimensiones relevantes. A partir de estos datos se elaboró una matriz valorativa de los procesos aplicados por cada entidad, lo que dejó establecer análisis comparativos e identificar patrones comunes, facilitando así la construcción del diagnóstico fundamentado.

Fase 3. Desarrollo y ejecución de un instrumento metodológico digital fundamentado en el análisis multicriterio. Para efectos analíticos, se llevaron a cabo aplicaciones utilizando *software* especializado, complementado con adaptaciones específicas orientadas a mejorar la experiencia de usuario en términos de usabilidad.

Se aplicó la metodología de decisión multicriterio, la cual permite la selección entre diversas alternativas basándose en múltiples criterios o variables de selección, típicamente estructurados jerárquicamente, que frecuentemente presentan relaciones de conflicto entre sí. El modelo se estructura jerárquicamente en forma descendente, estableciendo una vinculación directa entre el objetivo final, los criterios primarios y los subcriterios derivados. Un aspecto metodológico fundamental radica en la formulación rigurosa de criterios que cumplan simultáneamente con los requisitos de pertinencia y exclusión mutua, como se ilustra en la figura 6.5.

Figura 6.5. Metodología digital para el modelo AHP





Fuente: elaboración propia.

La metodología AHP opera mediante el procesamiento de valoraciones de juicio por parte de expertos en el área de estudio y procesando la información de acuerdo con principios de fundamentos matemáticos, que se traducen en matrices estructuradas en la escala de valoración propuesta por [26]. El instrumento metodológico incorpora una guía instructiva que acompaña al usuario durante cada fase del procedimiento analítico.

En lo concerniente a la adopción del ANP, se propone una metodología que comprende las siguientes etapas [27]:

- Identificación y selección de elementos constitutivos de la red, incluyendo alternativas decisionales y criterios evaluativos.
- Agrupación de elementos en componentes o clústeres según características homogéneas.

- Análisis estructural de la red de influencias mediante la construcción de la matriz interfactorial.
- Cómputo de prioridades relativas entre elementos mediante la elaboración de la supermatriz original.
- Determinación de prioridades entre clústeres para construir la supermatriz ponderada.
- Determinación de la supermatriz límite para establecer prioridades finales.

6.4 Resultados

El instrumento metodológico se adopta mediante una interfaz basada en ventanas emergentes integradas con Microsoft Excel®, proporcionando un entorno familiar para los usuarios. Esta interfaz facilita el ingreso sistemático de datos para la construcción de la estructura o matriz inicial. Subsecuentemente, mediante algoritmos de procesamiento establecidos en el código fuente, el sistema efectúa operaciones computacionales sobre la información ingresada y presenta los resultados mediante una visualización gráfica que destaca las alternativas de mayor prioridad. Esta representación visual permite al usuario identificar con precisión las características relevantes del proceso decisorio, considerando la interrelación entre variables y criterios contextuales, además de asignar valores cuantitativos a las comparaciones pareadas generadas a partir de los criterios y parámetros establecidos.

La arquitectura del sistema facilita al usuario la identificación y ejecución de tres fases metodológicas fundamentales:

Fase 1. Contextualización y análisis situacional, que puede abordarse mediante la utilización del caso base incorporado en el sistema o con la formulación de una nueva situación problemática.

Fase 2. Caracterización y descripción sistemática de las alternativas disponibles en relación con la situación objeto de análisis.

Fase 3. Especificación de criterios vinculados a las alternativas, donde el usuario define y caracteriza los parámetros evaluativos asociados con las alternativas previamente establecidas (representado en la figura 6.6).

Figura 6.6. Representación pantalla de alternativas y criterios

Alternativa 1	Proveedor 1	
Alternativa 2	Proveedor 2	
Alternativa 3	Proveedor 3	

	Criterios	Subcriterios
Criterio 1	C1. Tiempo	N/A
Criterio 2	C2. Precio	N/A
Criterio 3	C3. Diseño	SCD1. Durabilidad
		SCD2. Color
		SCD3. Material
Criterio 4	C4. Experiencia	N/A
Criterio 5	C5. Flexibilidad	SCF1. Medio
		SCF2. Plazo

Fuente: elaboración propia.

En este campo, se tiene en cuenta que se pueden tener criterios cuantitativos y cualitativos para la valoración de las alternativas, así como el sentido de preferencias para criterios cuantitativos (si es deseable un valor alto o bajo), y posibles comentarios orientadores para dar información relevante del nivel de preferencia en

criterios cualitativos. La tabla 6.2 muestra un ejemplo de posibles descriptores por tener en cuenta para el relacionamiento de criterios y alternativas.

Tabla 6.2. Datos de proveedores por evaluar

Proveedor	Tiempo entrega (días)	Precio (\$)	Diseño	Experiencia (años)	Flexibilidad
Proveedor 1	1	1,900	Madera, resistente	2	Tarjeta de crédito (1 a 30 días) o efectivo
Proveedor 2	5	245	Polipropileno, negro	1	Bancolombia, efectivo o Banco Caja Social
Proveedor 3	3	526	Polipropileno, azul	4	Tarjeta de crédito (1 a 45 días) o efectivo

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se deben calificar los elementos de la estructura (criterios, subcriterios y alternativas) según la escala de Saaty. Las instrucciones de manera numérica o verbal para calificar la importancia relativa de los criterios, y que condicionan los parámetros de entrada del modelo, se proponen de acuerdo con los valores del modelo AHP/ANP, los cuales van de 1 a 9 (1, 3, 5, 7 y 9) según la importancia relativa.

Cabe resaltar que existe la posibilidad de capturar la información de entrada requerida para la generación de los niveles de preferencia de distintas formas, entre ellas, por ejemplo, a partir de la normalización de valores de variables cuantitativas; nótense los valores de la variable precio de la tabla 6.2; mediante la matriz de comparación pareada mostrada en la figura 6.7 o mediante descriptores verbales que muestren niveles y sentidos de preferencia como se relaciona en la figura 6.8.

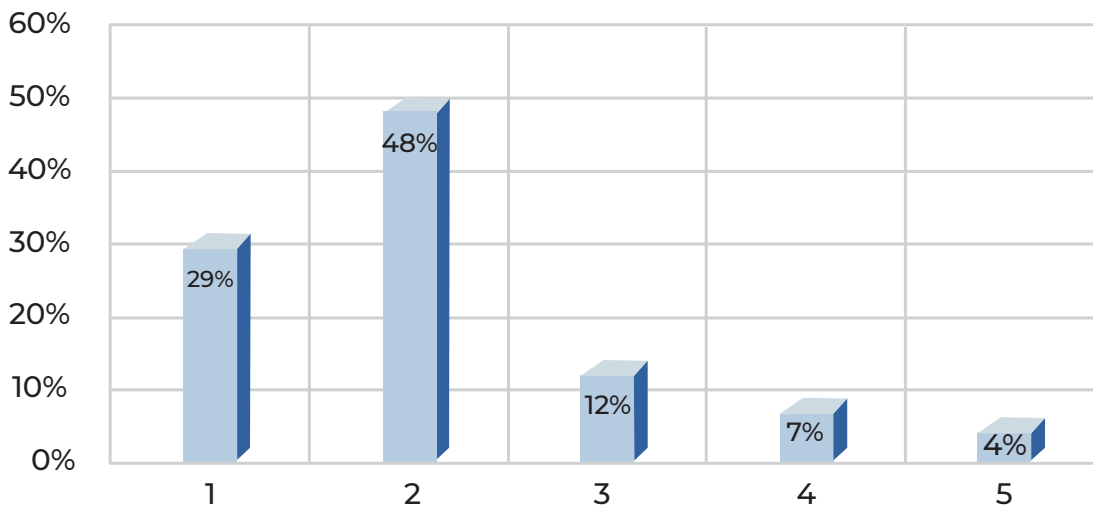
Figura 6.7. Comparación por pares

Network		Judgments	Ratings	3. Results	
1. Choose	2. Node comparisons with respect to C2. Precio			+	
Node Cluster	Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct			Normal	Hybrid
Choose Node	Comparisons wrt "C2. Precio" node in "Alternatives" cluster			Inconsistency: 0.01759	
C2. Precio	Proveedor2 is very strongly to extremely more important than Proveedor1			Proveedor1	0.06494
Cluster: Criterios	1. Proveedor1	>=9.5	9 8 7 6 5 4 3 2 1	2 3 4 5 6 7 8 9	>=9.5 No comp
Choose Cluster	2. Proveedor1	>=9.5	9 8 7 6 5 4 3 2 1	2 3 4 5 6 7 8 9	>=9.5 No comp
Alternatives	3. Proveedor2	>=9.5	9 8 7 6 5 4 3 2 1	2 3 4 5 6 7 8 9	>=9.5 No comp
	Proveedor2				0.59469
	Proveedor3				0.34037

Fuente: elaboración propia a partir del software Superdecisions.

Figura 6.8. Valores de importancia para criterios y presentación de resultados

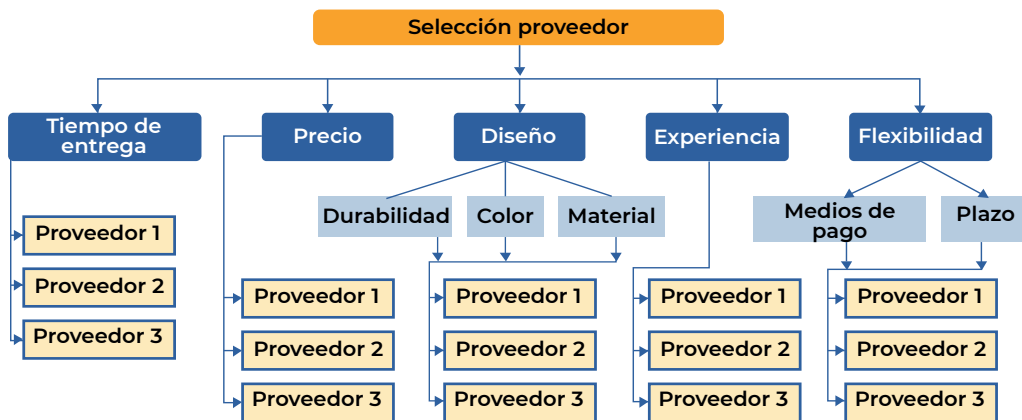
Matriz de comparación por pares						Vector prioridad
	Tiempo de entrega	Precio	Diseño	Experiencia	Flexibilidad	
Tiempo de entrega	1	0,50	3,00	5,00	7,00	29%
Precio	2,00	1,00	5,00	7,00	9,00	48%
Diseño	0,33	0,20	1,00	2,00	4,00	12%
Experiencia	0,20	0,14	0,50	1,00	2,00	7%
Flexibilidad	0,14	0,11	0,25	0,50	1,00	4%



Fuente: elaboración propia.

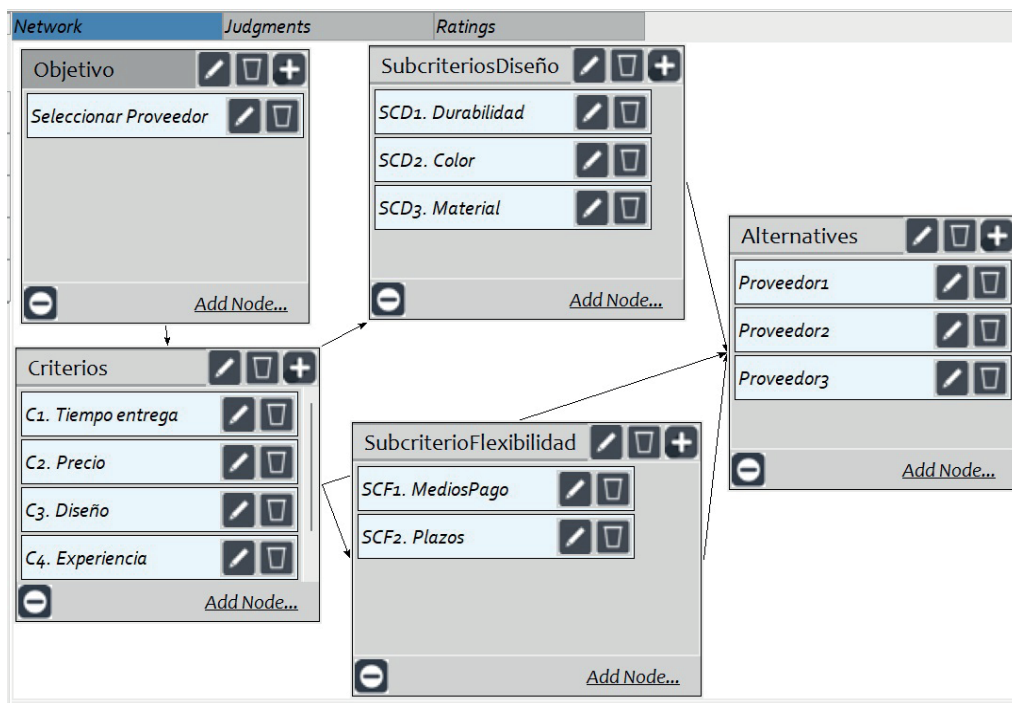
Para efectos de la formalización del problema mediante la utilización del método AHP y el método ANP, se relacionan respectivamente la estructura jerárquica (véase la figura 6.9) y la estructura en red (véase la figura 6.10) del modelo.

Figura 6.9. Estructura jerárquica del modelo



Fuente: elaboración propia.

Figura 6.10. Estructura de red



Fuente: elaboración propia a partir del software Superdecisions.

Los resultados finales de uno de los ejercicios realizados se muestran en las tablas 6.3 y 6.4, y en las figuras 6.11 y 6.12, donde se puede observar que se hace la valoración considerando múltiples criterios-subcriterios para la valoración de los proveedores de un producto o servicio.

En la tabla 6.3, se muestra el último punto que corresponde al proceso metodológico del ANP con la construcción de la supermatriz límite (se omiten ceros y se ajusta a escala porcentual); sin embargo, se efectúan adaptaciones propias como se observa en la tabla 6.4 para efectos de la explicación de los resultados.

Tabla 6.3. Supermatriz límite

LIMIT MA-TRIX	C1. Tie	C2. Pre	C3. Dis	C4. Exp	C5. Flex	SCF1. Med	SCF2. Plaz	SCD1. Durab	SCD2. Col	SCD3. Mat	Selecci~
Proveed1	70%	6%	32%	19%	8%	8%	18%	7%	70%	71%	15%
Proveed2	8%	59%	9%	11%	37%	70%	74%	66%	8%	14%	17%
Proveed3	21%	34%	8%	70%	5%	21%	8%	27%	21%	14%	14%
C1. Tiempo											14%
C2. Precio											23%
C3. Diseño											5%
C4. Experiencia											3%
C5. Flexibilidad											2%
SCF1. Medio					7%						0%
SCF2. Plazo					43%						2%
SCD1. Durabilidad			5%								1%
SCD2. Color			10%								1%
SCD3. Material			35%								4%




Fuente: elaboración propia a partir del *software* Superdecisions.

Tabla 6.4. Resumen de la evaluación de proveedores

CrITERIOS y subcriterios	Ponderaciones parciales	Ponderaciones totales	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3
Flexibilidad	4%				
Medios de pago	14%	1%	9%	70%	21%
Plazos	86%	3%	19%	74%	8%
Diseño	12%				
Tipo de material	70%	8%	71%	14%	14%
Color	19%	2%	70%	9%	21%
Durabilidad	11%	1%	7%	66%	27%
Experiencia	7%	7%	19%	11%	70%
Tiempos entrega	29%	29%	70%	9%	21%
Precio	48%	48%	7%	59%	34%
Calificación total			33%	37%	30%

Fuente: elaboración propia.

Figura 6.11. Ranking alternativas

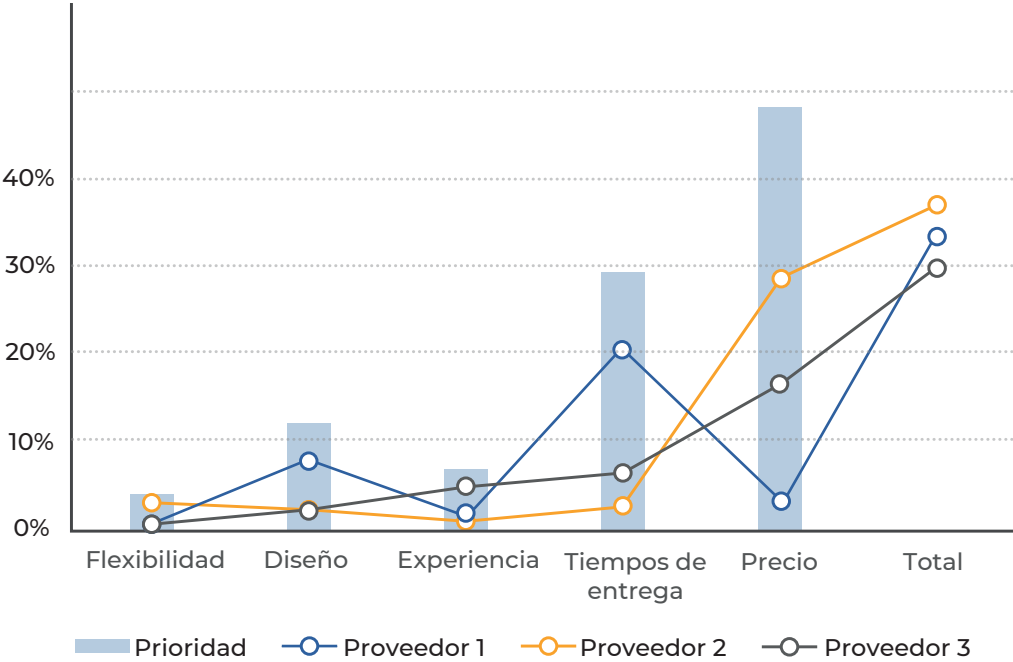
Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
Proveedor1		0.897355	0.332837	0.154339
Proveedor2		1.000000	0.370909	0.171994
Proveedor3		0.798725	0.296254	0.137376

Fuente: elaboración propia a partir del software Superdecisions.

En los datos mostrados en las figuras 6.11 y 6.12 se muestra que el proveedor 2 obtiene una mayor calificación general respecto a los proveedores 1 y 3; sin embargo, en la última se identifica con claridad que esto radica en un mayor nivel de preferencia del criterio *Precio* respecto a los demás criterios considerados. Se resalta, además, que existe potencial relativo de mejoramiento de este mismo proveedor en relación con el *Diseño*, la *Experiencia* y el *Tiempo de entrega*, y en este

orden de ideas se logra no solamente la priorización de un proveedor respecto a otros, sino oportunidades de mejoramiento, incluso para aquel que tiene un mejor resultado global.

Figura 6.12. Resumen resultados de la evaluación multicriterio



Fuente: elaboración propia

Para la validación del producto se recoge la información de las pymes, para varios casos, entre ellos el proceso de valoración de proveedores, donde cada gerente se apoya en los pasos directos de seguimiento que le ofrece la herramienta; cada uno describe alternativas y criterios relevantes. Una vez que cada gerente de pyme termina con los procedimientos indicados por la herramienta, esta les genera un gráfico con los valores de importancia para la toma de decisiones, como lo muestra la figura 6.7. Posteriormente, se efectúa un cuestionario de satisfacción de la usabilidad y funcionalidad de resultados en la toma de decisión obtenida y se tiene la valoración de que el 20 % de las personas reporta que considera el uso muy fácil; un 60 %, relativamente fácil, y el 20 % restante, mo-

deradamente difícil de manejar. Respecto a criterios de aplicabilidad en el uso de la herramienta desde la praxis, los usuarios que la aplicaron muestran un nivel de aceptación relevante reflejado en que el 98 % de los empresarios que hicieron el ejercicio, especifican que utilizarían la herramienta para soportar la toma de decisiones en el interior de su empresa en futuras ocasiones.

6.5 Conclusiones

En el contexto empresarial actual de Medellín, se ha identificado una necesidad apremiante en las pymes de adoptar metodologías y técnicas robustas que soporten y mejoren el proceso de toma de decisiones. La carencia de estos recursos de apoyo en la toma de decisiones conlleva decisiones basadas en la intuición o en datos insuficientes, incrementando la incertidumbre y el riesgo de resultados adversos para las organizaciones. En respuesta a esta problemática, se ha desarrollado y adoptado una herramienta innovadora diseñada específicamente para fortalecer la toma de decisiones en las pymes en el marco de la evaluación-reevaluación de proveedores externos. Esta herramienta proporciona a los empresarios una visión integral y clara de los criterios relevantes al analizar las diversas alternativas ante situaciones problemáticas que puedan impactar múltiples áreas de la organización. Los resultados obtenidos tras su adopción demuestran mejoras significativas para la toma de decisiones, evidenciando su pertinencia en estos contextos empresariales y agregando valor para las partes interesadas de forma que se contribuya al mejoramiento continuo del proceso relacionado.

Una de las ventajas clave de esta herramienta radica en su diseño intuitivo y su facilidad de adaptación para los usuarios. Mediante un proceso de validación riguroso, se ha comparado con

otras herramientas existentes en el mercado, constatando que estas últimas no se ajustan al alcance económico de las pymes de Medellín o requieren de una capacitación especializada que excede las capacidades de los empresarios locales. En contraste, la herramienta digital desarrollada se distingue por su accesibilidad y su capacidad para proporcionar evidencia clara de las relaciones entre criterios y variables relevantes para la toma de decisiones que inciden de forma positiva en las áreas organizacionales de interés para los empresarios.

Los métodos multicriterio AHP o ANP, según sea la estructura (jerárquica o de red), permiten que la herramienta integre el proceso metodológico y el ejercicio de apoyo a la toma de decisiones multicriterio, considerando elementos tanto cuantitativos como cualitativos y de manera particular se adapta a los procesos de evaluación-reevaluación y mejora de proveedores externos.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses de índole comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

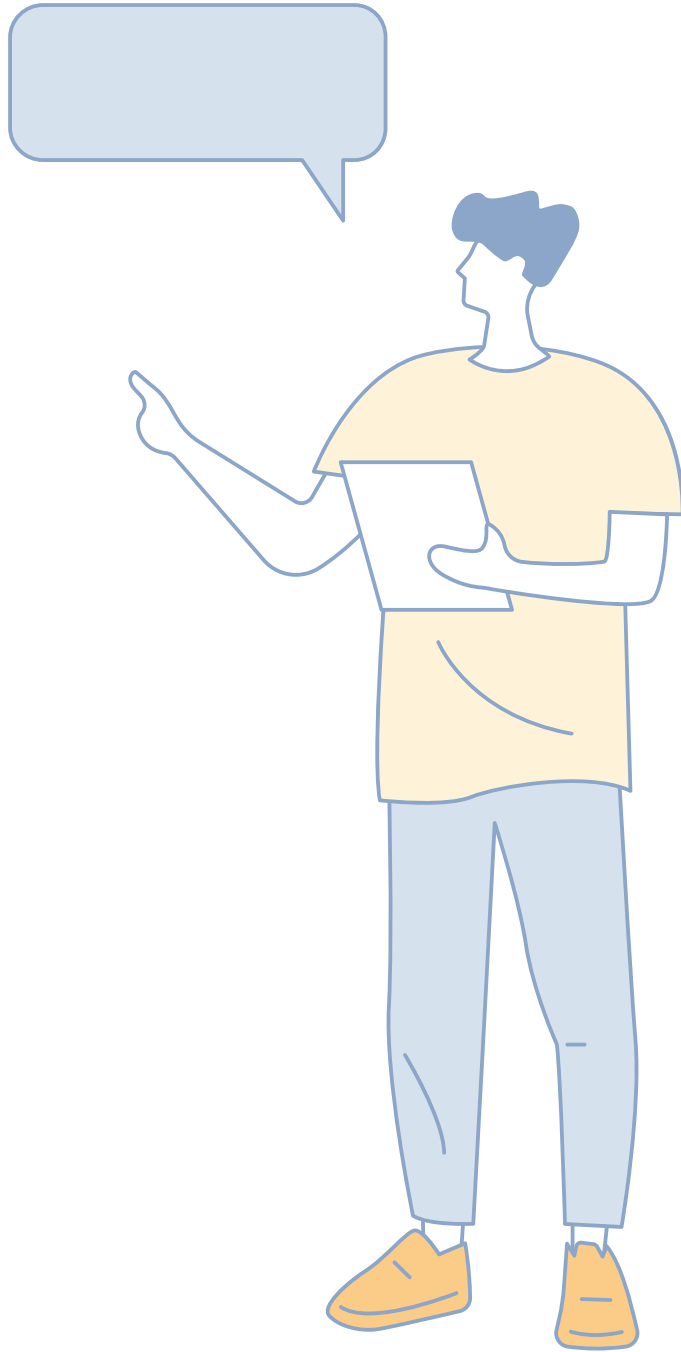
La presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno, la sociedad o el medioambiente.

Referencias

- [1] Alcaldía de Medellín, “Plan de Desarrollo Medellín Futuro 2020 - 2023,” 2020. [Online]. Available: <https://www.medellin.gov.co/es/plan-de-desarrollo/>. [Accessed: Sep. 19, 2022].
- [2] Gobernación de Antioquia, “Plan de Desarrollo Antioquia 2020 -2023,” 2020. [Online]. Available: <https://plandesarrollo.antioquia.gov.co/>. [Accessed: Sep. 19, 2022].
- [3] T. L. Saaty, *Toma de decisiones para líderes: El Proceso Analítico Jerárquico la toma de decisiones en un mundo complejo*, 2014.
- [4] E. Tafernaberrí Franzão, *Desarrollo de metodología de decisión multicriterio ANP en la gestión de proveedores: integración de selección, evaluación y desarrollo de proveedores*. Universitat Politècnica de València, 2018.
- [5] S. N. Hernández Fuentes y K. Y. Sánchez Mojica, “Innovación y competitividad: micro y pequeñas empresas del sector agroindustrial en Cúcuta,” *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, vol. 8, no. 1, pp. 23–33, Dec. 2017, doi: 10.19053/20278306.V8.N1.2017.7368.
- [6] Congreso de Colombia, *Ley 1450 de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014*. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43101>. [Accessed: Sep. 18, 2022].
- [7] A. Tundidor Díaz, *Cómo innovar en las pymes: Manual de mejora a través de la innovación*, 2016.
- [8] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, “Decreto 957 del 05 de junio,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mincit.gov.co/normatividad/decretos/2019/decreto-957-por-el-cual-se-adiciona-el-capitulo-13>. [Accessed: Sep. 19, 2022].
- [9] G. Rodríguez Bárcenas, *Red de inteligencia compartida organizacional como soporte a la toma de decisiones*, 2013.

- [10] A. M. Cano Morales, *Contabilidad gerencial y presupuestaria, aplicada a ciencias económicas, administrativas y contables*. Colombia: Ediciones de la U, 2017.
- [11] M. N. Manzanal, G. S. Milanesi, H. P. Vigier y L. Toscana, "Análisis del impacto de heurísticas en la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre en las pymes," *Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa*, vol. 23, no. 37, Aug. 2015. [Online]. Available: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/11985>. [Accessed: Sep. 18, 2022].
- [12] L. J. Quintero Campos, *La innovación como sistema. La innovación con el apoyo estatal en Colombia*. Bogotá, 2015. [Online]. Available: <https://www.uta-deo.edu.co/es/publicacion/libro/editorial/235/la-innovacion-como-sistema>. [Accessed: Sep. 18, 2022].
- [13] E. Gore, *El próximo management. Acción, práctica y aprendizaje*, 2012.
- [14] M. L. Saavedra García y B. Tapia Sánchez, "El uso de las tecnologías de información y comunicación TIC en las micro, pequeñas y medianas empresas (MIPyME) industriales mexicanas," *Enlace*, vol. 10, no. 1, pp. 85–104, 2013.
- [15] International Organization for Standardization, *ISO 9001:2015. Sistema de Gestión de la Calidad. Requisitos*, Norma Internacional, 2015.
- [16] T. L. Saaty, "Decision making with the Analytic Hierarchy Process," *Int. J. Services Sciences*, vol. 1, pp. 83–98, 2002.
- [17] J. Rositas y J. Mendoza-Gómez, *El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método innovador en la toma de decisiones grupales*, 2013.
- [18] T. L. Saaty, "Decision making – the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP)," *J. Syst. Sci. Syst. Eng.*, vol. 13, no. 1, 2004, doi: 10.1007/s11518-006-0151-5.
- [19] F. J. Ortiz Correa y J. F. Diago Farinango, "Priorización de estrategias corporativas y competitivas a partir de la integración del análisis DOFA y la herramienta multicriterio ANP," 2014. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/17411>. [Accessed: Dec. 07, 2022].
- [20] M. D. P. Báez Roa y G. A. Puentes Montañez, "Parámetros financieros para la toma de decisiones en pequeñas y medianas empresas del municipio Duitama, Colombia," *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 24, no. 1, pp. 67–84, 2018. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7024153>. [Accessed: Sep. 19, 2022].
- [21] V. H. Macías Ramírez y D. E. Ramírez Ospina, "Sucesión en empresas familiares. análisis desde la teoría de la agencia. caso: caldas," *Criterio Libre*, vol. 9, no. 15, 2017, doi: 10.18041/1900-0642/criteriolibre.2011v9n15.1208.

- [22] M. E. Pérez, "Impacto de la toma de decisiones basada en los modelos de investigación de operaciones en la dirección de proyectos de ingeniería para el sector privado," 2017. [Online]. Available: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/14514>. [Accessed: Sep. 19, 2022].
- [23] A. I. Montilla Pareja, "Importancia para las pymes venezolanas del uso de los sistemas de soporte a la toma de decisiones," *Negotium: Revista de Ciencias Gerenciales*, vol. 11, no. 31, pp. 91–111, 2015. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7206669>. [Accessed: Sep. 19, 2022].
- [24] E. Rodríguez Ponce, "Estilos de liderazgo, toma de decisiones estratégicas y eficacia: Un estudio empírico en pequeñas y medianas empresas," *Interciencia*, vol. 32, no. 8, pp. 522–528, 2007. [Online]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000800007. [Accessed: Sep. 18, 2022].
- [25] C. A. Bernal, *Metodología de la investigación. Administración, economía, humanidades y Ciencias Sociales*, 3rd ed., 2010.
- [26] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process—what it is and how it is used," *Math. Modelling*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161–176, Jan. 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [27] J. Aznar Bellver, "ANP. Ejemplo," Jul. 2012. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/16720>. [Accessed: Dec. 06, 2022].





Capítulo 07

Rendimiento y salud en el deporte soportado en inteligencia computacional

Performance and Health in Sports Aided by Computer Intelligence

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/97866287751415.07>

Mariana Guzmán-Carmona ¹

Marcela Vallejo ²

Edilson Delgado-Trejos ³

¹ Investigadora, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-2293-4782, correo electrónico marianaguzman301446@correo.itm.edu.co

² Docente investigadora, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-9724-3169, correo electrónico marcelavallejo@itm.edu.co

³ Profesor titular, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-4840-478X, correo electrónico edilsondelgado@itm.edu.co

Resumen. En las disciplinas deportivas es necesaria la realización periódica de evaluaciones que ayuden a conocer la salud y el nivel del rendimiento físico de los deportistas. La inteligencia computacional permite valoraciones precisas y objetivas, por su capacidad de modelar sistemas a partir de altos volúmenes de datos. Las máquinas de aprendizaje y la visión artificial han sido ampliamente usadas en este contexto, especialmente, para predecir lesiones que puedan comprometer la salud del deportista. Sin embargo, la complejidad de estos procesos conlleva a muchos desafíos para su implementación, en cuanto a la confiabilidad de los resultados obtenidos. El presente trabajo contiene una revisión de la literatura sobre avances científicos que involucran el entrenamiento de máquinas de aprendizaje en el análisis de posturas y movimientos de deportistas. Para esto, se hizo una búsqueda exhaustiva en diferentes bases de datos y se seleccionaron aquellos documentos científicos que reportaran de forma precisa el reconocimiento de los movimientos, posturas y gestos en función de comparar, guiar y evaluar la actividad física de la disciplina deportiva particular. Finalmente, se identifican retos y oportunidades de nuevas investigaciones según tendencias, fortalezas y debilidades de la inteligencia de cómputo como herramienta de soporte al entrenamiento deportivo.

Palabras clave: inteligencia computacional, máquinas de aprendizaje, movimientos deportivos, posturas deportivas, predicción de lesiones, salud deportiva, visión artificial.

Introducción



En años recientes, han venido apareciendo avances informáticos que intervienen en diversos ámbitos de la vida humana, tal como es el caso de las aplicaciones en línea o en la nube, que están definidos en forma de avances científicos para el tratamiento automático de la información por medio de inteligencia de cómputo, en orden de procesar la dinámica o estados funcionales de los datos recolectados [1].

Ahora bien, el deporte es una disciplina que no escapa del crecimiento tecnológico y científico, ya que requiere de evaluaciones constantes que sirven para comprobar los alcances del rendimiento físico adecuado y si se cumple una correcta postura corporal por parte de los deportistas, lo cual cobra importancia,

puesto que, cuando no se respeta la correcta alineación de las articulaciones, los músculos tienen que hacer un sobreesfuerzo y las probabilidades de sufrir dolores y lesiones son considerables [2].

En este sentido, la inteligencia computacional ha demostrado bondades para el procesamiento de altos volúmenes de información, que permite de forma natural su vínculo en el análisis de la postura de los deportistas, gracias a que se configura como un recurso que contribuye a la examinación y estudio de forma más precisa [3].

El movimiento involucrado, tanto en las técnicas como en la postura de los deportistas, requiere ser analizado rigurosamente a fin de evitar lesiones que puedan comprometer la salud por la actividad física [4]. Estos análisis exigen la evaluación de la postura de los atletas con altos niveles de precisión por medio de rutinas de cómputo sobre bases de información compuesta por variables fisiológicas, psicológicas, bioquímicas y antropométricas con imágenes o videos, con el fin de adquirir indicadores o puntos focales extraídos del procesamiento computacional [5].

Frecuentemente, se reportan estudios basados en máquinas de aprendizaje y redes de sensores [6], que conllevan dificultades y retos para su ejecución y desarrollo, y se constituyen como soluciones aplicables con éxito, asegurando su no interferencia en las actividades físicas [7]. Asimismo, existen dificultades relacionadas con la disponibilidad de datos actualizados y fiables, en cuanto a la precisión de los movimientos, la claridad de las imágenes o videos, el acceso a equipos de última tecnología y las posibilidades de una adopción ajustada [6], por lo cual se busca el desarrollo de sistemas de bajo costo y de fácil operación que ayuden a resolver casos particulares de posturas, movimientos y técnicas, con el objetivo de obtener mejores resultados de éxito

en las competencias, con base en análisis derivados de datos reales, verídicos y confiables [8].

Por estas razones, se requiere el conocimiento del estado de desarrollo técnico, tecnológico y científico en cuanto a los procesos de cómputo aplicados al análisis de posturas en deportistas, con el fin de abordar esta área del conocimiento desde sus retos y oportunidades.

En este artículo, se presenta una revisión del estado del arte sobre el análisis de posturas en deportistas con apoyo en inteligencia computacional para sistemas de soporte de decisión que incrementen los niveles de competencia y disminuyan los eventos adversos en la salud. El proceso de selección de las fuentes consultadas para incluirlas en este trabajo se derivó de la revisión exhaustiva de reportes técnicos en bases de datos especializadas, a fin de considerar avances científicos y todo lo relacionado con las tendencias de investigación.

7.2 Método de la revisión

Se adelanta una búsqueda sistemática de información referente a los procesos de cómputo aplicados al análisis de posturas en deportistas. Para esto, se hizo una revisión bibliográfica en bases de datos especializadas, como se observa en la tabla 7.1, a fin de visualizar de forma precisa el reconocimiento de los movimientos, poses y gestos humanos relacionados con técnicas en el deporte que ayuden a comparar, guiar y evaluar la actividad física. Además, se consultaron publicaciones sobre la adopción de rutinas, métodos y programas computacionales, con el fin de revisar tendencias, fortalezas y debilidades de los procesos de cómputo en el área deportiva. En particular, la búsqueda en las bases de datos comenzó en marzo de 2022 y durante este período se

hizo la revisión de la documentación con enfoque en máquinas de aprendizaje automático, procesamiento de datos y reconocimiento de posturas en atletas, por lo que se incluyeron diferentes filtros, con el fin de hacer más específica la selección de artículos.

Tabla 7.1. Resultados de la búsqueda bibliográfica en las bases de datos usadas

Base de datos				
Términos	ScienceDirect	IEE Explore	Google Scholar	Fecha de revisión
"Machine learning" AND "athlete training"	957	36	15	14/03/2022
"Machine learning" AND "posture" AND "sports"	2.172	24	20	14/03/2022
"Outdoor" AND "sports" AND "pose"	3.845	24	18	15/03/2022
"Sport analysis" AND "position" AND "posture" AND "image processing"	6.107	13	10	16/03/2022
"Image recognition" AND "sport training"	29	10	5	17/03/2022
"Key point annotations" AND "Deep learning"	10	15	8	17/03/2022
"Computer vision" AND "sport videos"	6.178	610	250	18/03/2022
"Computer vision" AND "sport images"	8.654	813	36	21/03/2022
"Movement variability" AND "sports"	17.607	21	33	22/03/2022

Fuente: elaboración propia.

El criterio y justificación de la información seleccionada en este estudio, se sustentó en la revisión y análisis que se hicieron de las siguientes preguntas de investigación:

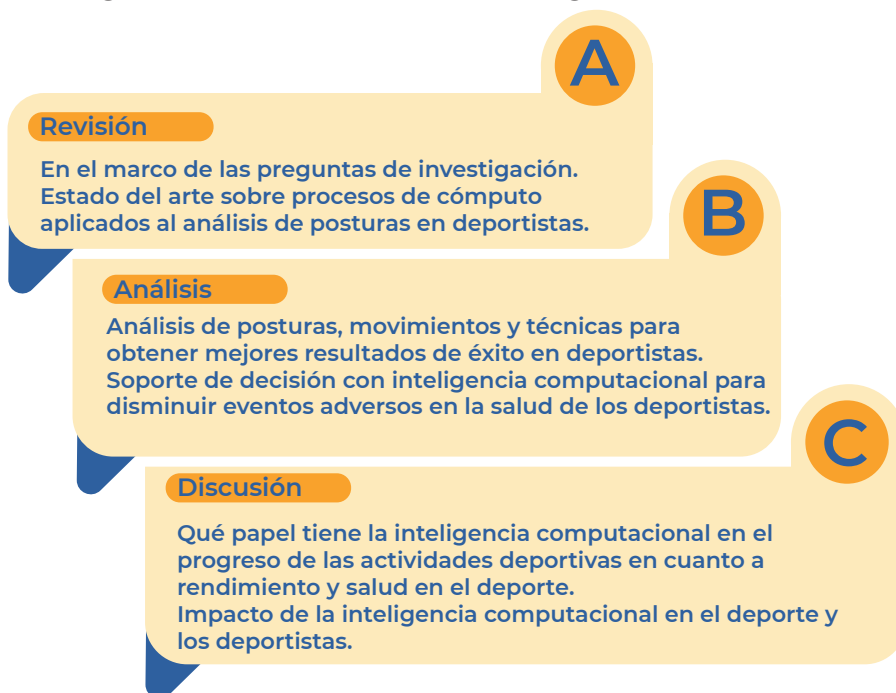
- ¿De qué manera la inteligencia computacional por medio del uso de algoritmos, sensores, cámaras y dispositivos inteligentes

puede influir en el análisis de posturas, movimientos y técnicas para la mejora del rendimiento deportivo?

- ¿En qué medida la visión artificial y el análisis biomecánico ayudan a predecir los riesgos que tienen los jugadores de sufrir lesiones en las competencias o entrenamientos deportivos?
- ¿Por qué los sistemas automatizados asistidos por inteligencia computacional pueden maximizar el rendimiento competitivo sin comprometer la salud de los deportistas?

Así como se muestra en la figura 7.1, con estas preguntas se identificaron tendencias y enfoques en cuanto al papel de los procesos de cómputo aplicados al análisis de posturas en deportistas para evitar lesiones. La selección final de la documentación quedó constituida de 82 reportes que cubrieron preferencialmente el período entre 2017 y 2022.

Figura 7.1. Etapas de la metodología de la revisión



Fuente: elaboración propia.

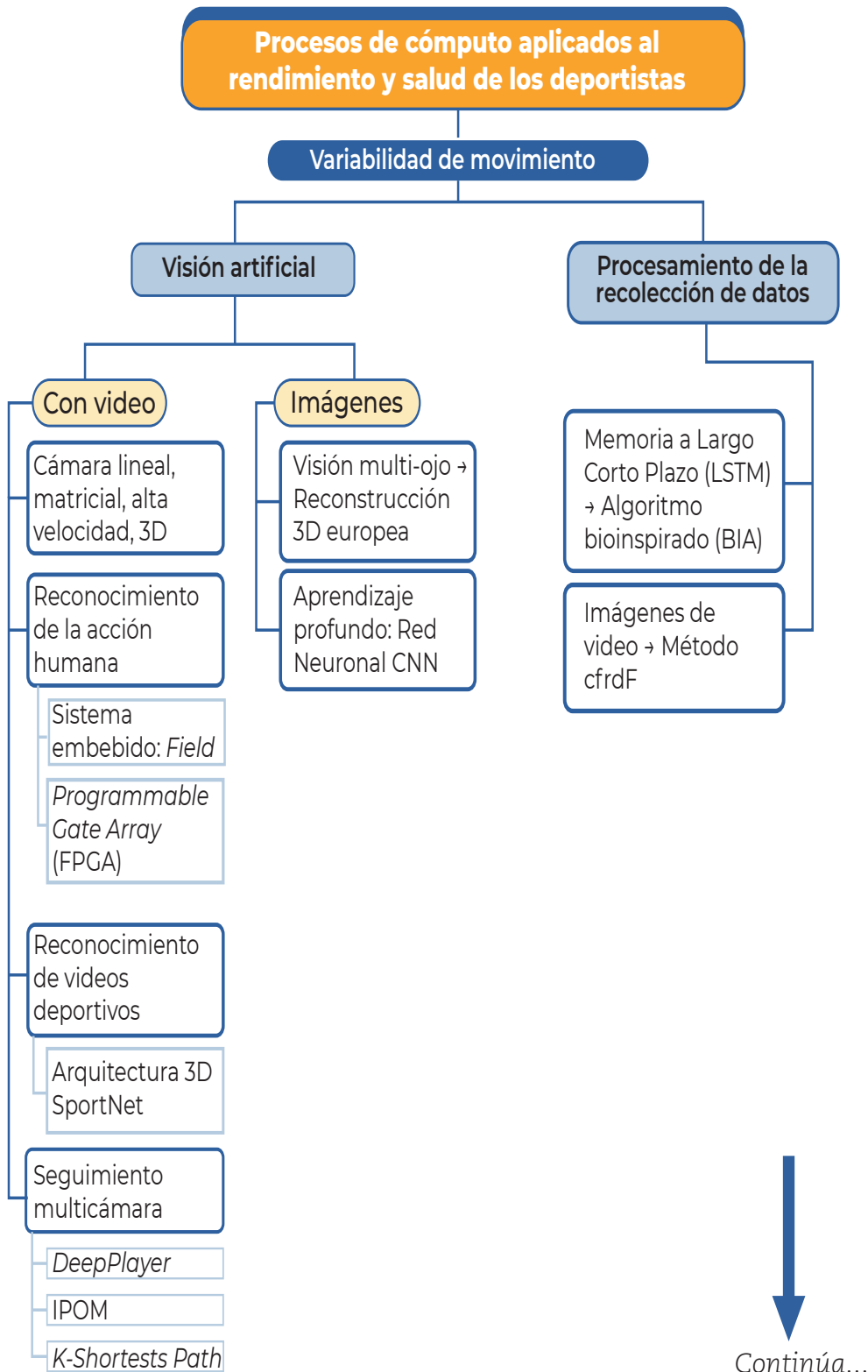
7.3 Desarrollo de la revisión

En esta sección se desarrollan las líneas de tendencia encontradas en la literatura, que se asocian con las preguntas de investigación tomadas en cuenta para la selección de reportes científicos, tal y como se ilustra en las figuras 7.2 y 7.3.

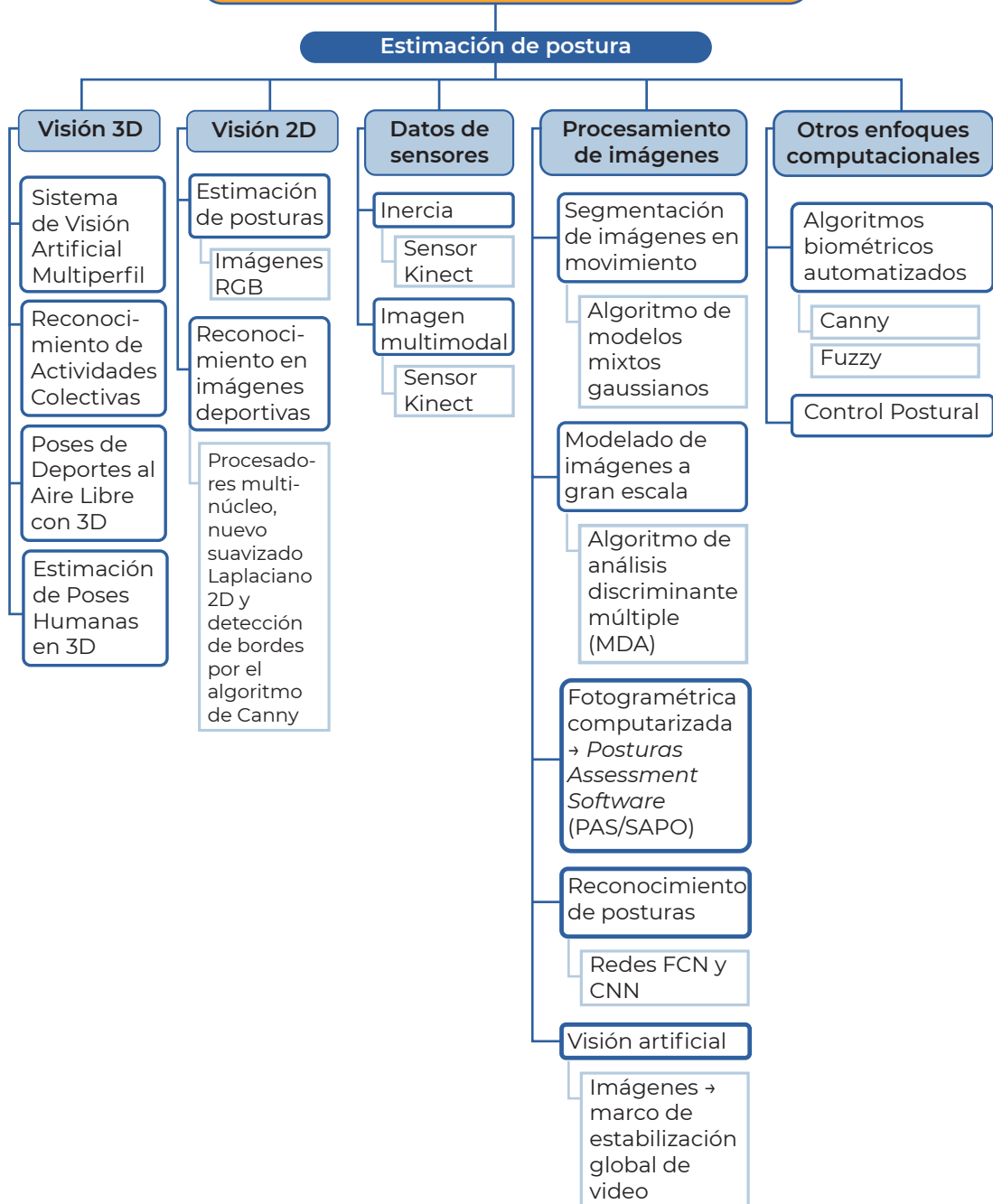
El desarrollo de la revisión toma como concepto de profundización los procesos de cómputo aplicados a la variabilidad del movimiento, el análisis de posturas y el impacto que puede lograrse en el rendimiento y salud de los deportistas. En particular, en este apartado se presentarán aquellas investigaciones, artículos, libros y otros documentos que se enfocan en describir el estado de desarrollo técnico, tecnológico y científico y que permiten esclarecer ideas y tendencias, al tiempo que agregan valor a la literatura existente y se delimitan problemas abiertos que deberían impulsar nuevos retos a ser abordados por ejercicios investigativos en las iniciativas que surjan en el corto y mediano plazo.



Figura 7.2. Técnicas aplicadas al análisis de postura y movimiento en deportistas

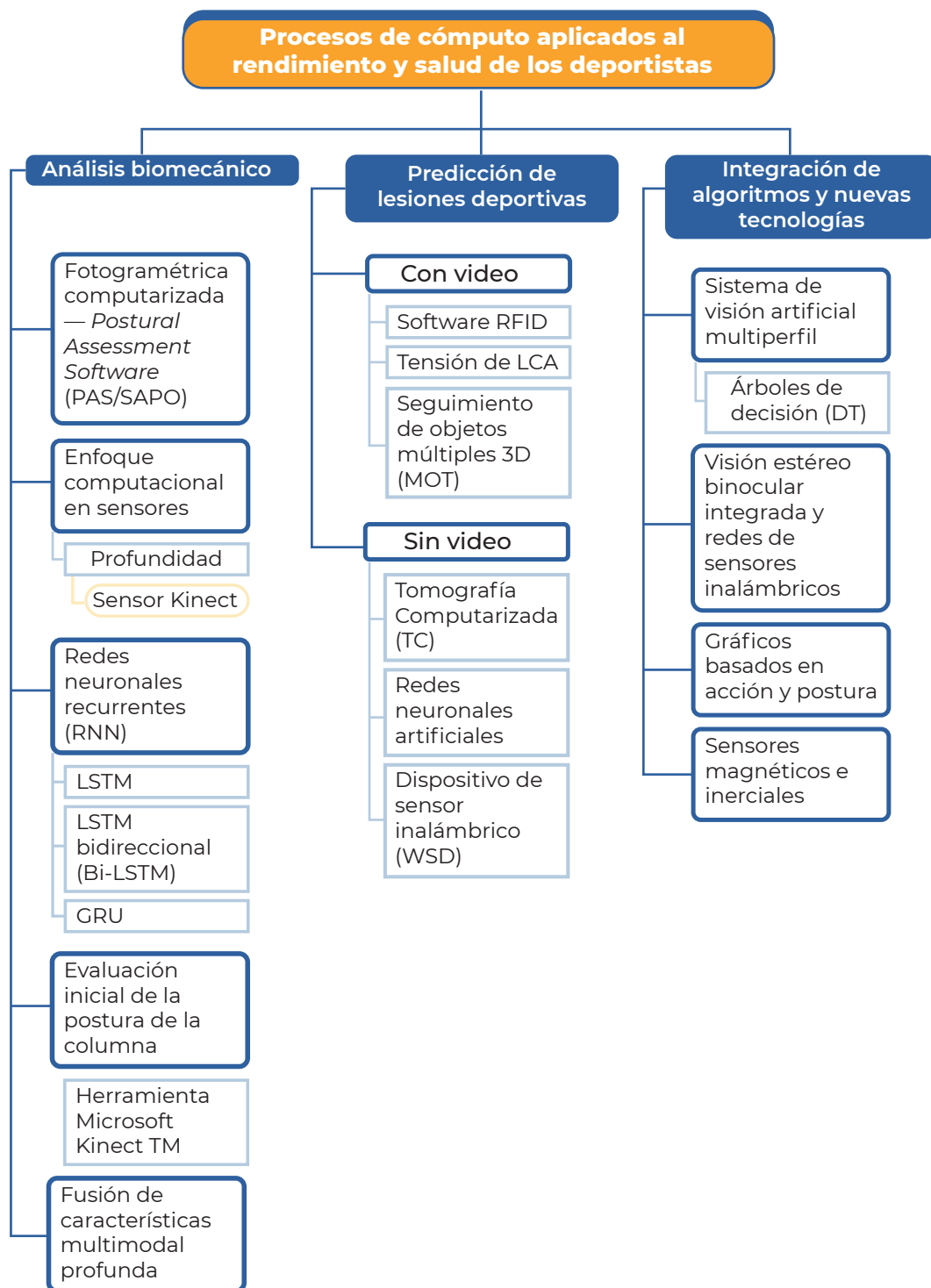


Procesos de cómputo aplicados al rendimiento y salud de los deportistas



Fuente: elaboración propia.

Figura 7.3. Algoritmos y nuevas tecnologías para evaluación de deportistas



Fuente: elaboración propia.

7.4 Variabilidad del movimiento

El movimiento es una característica inherente de la naturaleza, que se observa de manera destacada en los sistemas biológicos, sobre todo en los seres humanos [9], siendo también diferenciadora de cada individuo, que lo hace único. Por tanto, la variabilidad del movimiento está supeditada a transformaciones o alteraciones habituales que se producen durante la ejecución de múltiples repeticiones [10].

Ahora bien, desde el punto de vista del movimiento humano en los entrenamientos deportivos, la idea principal de la variabilidad consiste en que cada vez que se repite el mismo movimiento complejo en el que intervienen más de dos articulaciones, si se graban y superponen, se aprecian ciertas diferencias en el patrón descrito entre una y otra, independientemente de cuan familiarizado esté el sujeto con el acto [11], es decir, que cada deportista, atendiendo a sus diferencias individuales, tanto en estructura corpórea como en la ejecución de los gestos deportivos, existe variabilidad en sus patrones, conservando alguna relación con otros deportistas [12].

Cabe destacar que la variabilidad del movimiento desde un modo fisiológico tiende a ser cambiante e inestable, en especial, en aspectos como el manejo de la carga, la utilización de los métodos de fuerza y resistencia y el aprovechamiento de los diferentes medios para la realización de los ejercicios [13]. Si estos elementos no son manejados adecuadamente, pueden causar daños en la salud [14]. En este sentido, se pueden considerar tres (3) tipos de movimientos [15]:

- **Movimiento alterado o inframovimiento.** Está caracterizado por 1) exceso de movimientos anormales involuntarios o 2) pobreza o lentitud debida a síndromes rígido-cinéticos.

- **Movimiento funcional o normomovimiento.** Actividad neuromotora que ejecutan los seres humanos en su vida cotidiana, por ejemplo, sentarse, pararse, agarrar, empujar, golpear, correr y saltar, entre otros. En la práctica deportiva pueden interferir en ejecuciones incorrectas, provocando traumatismos por sobreuso.
- **Movimiento complejo o supramovimiento.** Acciones neuromotoras que implican gran habilidad en su ejecución, donde se utiliza un número importante de cambio en los planos de movimiento, grados de libertad y arcos de movilidad, en periodos de tiempo muy cortos. Estos movimientos deben ser dirigidos y supervisados por un especialista, dado que una mala praxis puede ocasionar esguinces, dolores articulares y lesiones leves o severas dependiendo de variables como volumen, intensidad y frecuencia.

Tomando en cuenta lo anterior, se justifica la importancia de la detección automatizada de parámetros asociados con la variabilidad del movimiento, ya que una percepción amplia, clara y precisa de las actividades deportivas y la comprensión de la biomecánica de las cargas permiten la prevención de daños en la salud [16], promoviendo prácticas adecuadas y sistemáticas, y mejorando el rendimiento motor que ayuda a incrementar la condición física [17]. Otros beneficios se relacionan con el desarrollo de patrones de movimiento eficientes, conservación de la energía, reducción del desgaste de articulaciones y ligamentos, y la eliminación de los desequilibrios musculares [18].

7.4.1 Variabilidad del movimiento por visión artificial en registros de video

La adopción de sistemas de visión artificial para el análisis biomecánico requiere la integración de interfaces humano-máquina

(HMI) con el uso de diversos dispositivos de adquisición de video de tipo lineal, matricial, alta velocidad y 3D, entre otras. En [19] se propone la evaluación de los gestos generados por un ciclista durante el proceso de pedaleo, con el fin de inferir su postura. Para los experimentos, se hizo la elección de la plataforma de *software* según recomendaciones incluidas en el estándar ISO/IEC 25000. Se tomaron mediciones reales del tren inferior, tren superior y tronco del esqueleto para compararlas con las inferidas digitalmente, alcanzando resultados promisorios en cuanto a la precisión de las mediciones obtenidas. Se determinó que el procesamiento cinemático de la postura debía ser realizado después de recoger la información de todos los fotogramas, con el fin de no perder eficiencia en la velocidad de adquisición, debido al límite de la memoria computacional.

En [14] se discute sobre el reconocimiento del movimiento humano usando imágenes de video para danza deportiva, donde se usó el espacio algebraico-geométrico para construir un algoritmo de coincidencia capaz de alcanzar la adaptación de un ángulo en escala continua, en función de la aproximación entre las placas horizontales y las imágenes detectadas. Los resultados mostraron que el algoritmo no solo garantiza la precisión e integridad de los datos obtenidos, sino que también elimina el ligero movimiento del fondo hasta cierto punto.

En [20] se usan registros de audio y video de danza clásica en la India, extraídas de YouTube durante actuaciones en vivo, con aplicación al reconocimiento de gestos y movimientos en el aprendizaje de baile, donde se integran los sistemas embebidos (i.e., una FPGA, field programmable gate array) y la visión artificial. Los resultados muestran una tasa de reconocimiento hasta el 90 %. Estos, en términos de reconocimiento de la variabilidad del movimiento, son superados con el uso de una arquitectura profunda y novedosa denominada 3DSportNet, que reconstruye

escenarios deportivos en 3D haciendo uso de múltiples videos capturados por teléfonos inteligentes [21]. Los resultados mostraron que el consumo de tiempo de reconstrucción 3D se reduce 95 % en comparación con los métodos convencionales.

Otros reportes proponen la representación distinguible de la identidad de cada jugador, ya que generalmente existe un problema crítico cuando el atleta interactúa entre objetos. En [22] se discute sobre el desempeño de rutinas de cómputo integradas al seguimiento multicámara-multijugador con identificación profunda del jugador desde registros de video.

Se prueban tres modelos:

1. a) el modelo de identificación profunda del jugador,
2. b) el modelo de mapa de ocupación de probabilidad individual, y
3. c) el modelo de vía más corta con identificador del jugador.

Los resultados del experimento indican que el marco que maneja los cambios de identidad cumple su función de manera efectiva y se logra el enfoque del jugador eliminando cualquier ente que reste visibilidad. Se puede afirmar, entonces, que la visión artificial aplicada a registros de video se convierte en una herramienta esencial para cualquier práctica deportiva, debido a que existen competencias atléticas que son dinámicas, consecutivas y de alta velocidad, donde el ojo humano no es capaz de asimilar en detalle, por lo que son necesarias las ayudas tecnológicas que permitan el análisis cualitativo y cuantitativo en función de la eficacia y efectividad de jugadas y técnicas [23].

De esta manera, los entrenadores pueden apoyarse en herramientas basadas en visión artificial e inteligencia computacional

para el análisis de la variabilidad de los movimientos y gestos hechos por los deportistas durante el entrenamiento, integrando dispositivos de alta resolución en cuanto a enfoque y precisión, pues estas herramientas también contribuyen a eliminar el ligero movimiento del fondo en los videos o aquellos elementos que hacen difícil la captación con exactitud y claridad [24].

7.4.2 Variabilidad del movimiento por visión artificial sobre registros de imágenes

La literatura reporta tecnologías de visión estéreo binocular integrada, dentro de las estrategias de visión artificial para la identificación de la variabilidad del movimiento, mediante la comparación de plantillas de imágenes, con lo que se pueden extraer las coordenadas de los puntos de medición y restaurar las coordenadas espaciales [25]. Mediante la reconstrucción 3D, estas tecnologías permiten explorar la relación entre los parámetros biomecánicos deportivos durante los movimientos.

No obstante, a pesar de que la adaptabilidad de estos sistemas ha logrado resultados notables, aún hay aspectos que necesitan ser mejorados en cuanto a la velocidad de procesamiento. En [26] se discute la aplicación de un método de evaluación del nivel de desempeño en boxeo en cuanto a habilidades y destrezas, usando visión artificial sobre registros de imágenes, incorporando la claridad de las acciones, la flexibilidad de las transiciones y la imprevisibilidad de los patrones de acción. Para esto, se usaron índices numéricos como el de conectividad y el de estrategia de acción, que ayudan a identificar el nivel de habilidad, según el gráfico Fat Graph, facilitando la visualización de la calidad de las posturas estándar para las acciones de lanzamiento y finalización. Aunque el foco de este estudio fue la aplicación al boxeo, los desarrollos teóricos permiten aplicaciones a la mayoría de los

deportes que requieran rapidez, flexibilidad y creatividad, como el tenis, la esgrima y el baloncesto.

Se han invertido esfuerzos experimentales para la búsqueda de un dispositivo que ayude a la mejora del rendimiento deportivo minimizando costos económicos y computacionales, de manera que no se requieran grabaciones de video ni laboratorios especiales y conserve su rendimiento, aunque se encuentre por fuera de ambientes controlados. En [27] se llevó a cabo el desarrollo de un sistema portátil, de integración compacta, inalámbrico y de bajo costo, para analizar la posición angular tridimensional en ocho puntos, con una tasa de muestreo mucho más baja en comparación con otras tecnologías, centrándose en la evaluación de valores mínimos y máximos de la marcha para la obtención de un análisis completo de la cinemática de datos del tronco, pelvis, cadera, rodilla y tobillo durante la marcha.

Se requirió la participación de 10 voluntarios, a los cuales se les hicieron pruebas para evaluar las características metrológicas del sistema, donde se usó la capacidad de representación del filtro de Kalman y otros ensambles de filtración complementaria. Como resultado se determinó que este sistema puede usarse en cualquier tipo de entorno en tiempo real con mediciones precisas y confiables, mediante modelado simple para su aplicación en arquitecturas embebidas, permitiendo un margen de error inferior al 5 % en el análisis de marcha para la segmentación de imágenes de video transmitidas en vivo. En [28] se propone un algoritmo avanzado de optimización por enjambre de partículas (PSO) y agrupación por vectores de soporte (SVC), donde se intervienen los aspectos de detección, procesamiento en escala de grises, contraste de la luz y mezcla de imágenes, entre otros. En este trabajo se obtuvo una plataforma de inspección y reconocimiento del movimiento derivado del comportamiento motor de

los atletas, con facilidades para observar la efectividad y desempeño del algoritmo, quedando una base teórica para este tipo de segmentación de imágenes.

La aplicación de técnicas de visión artificial para extraer los datos adecuados de las imágenes extraídas de los videos, a modo de parámetros específicos relacionados con la complejidad de las características perceptivas de los movimientos, se propone como herramienta de rastreo de ubicación, distancia, velocidad y aceleración. En [29] se presenta un estudio que, mediante técnicas de visión artificial, busca capturar y registrar la percepción del movimiento de un artista de danza corporal desde imágenes de la escena en movimiento, observando que la aplicación computacional en el baile grupal proporciona funciones de bajo nivel y una tasa avanzada de reconocimiento del movimiento, mediante otro módulo de análisis de movimiento paralelo que se utiliza como entrada para evaluar el desempeño de los bailarines.

En [30] se presenta un sistema de detección de imágenes aplicado a deportes de playa basado en un multiprocesador heterogéneo y una red neuronal convolucional (CNN). Este estudio identifica y clasifica la ejecución de los servicios en deportes de playa a partir del despliegue de giroscopios de brazo. Con este trabajo se pudo analizar con precisión el movimiento de los jugadores, usando tecnología portátil con posibilidad de eliminación de datos ruidosos e irrelevantes, mediante una técnica de detección de bordes iguales, procesamiento de gradación y reconocimiento de patrones combinado a necesidades en la detección de imágenes dinámicas diferentes. Los resultados demuestran que la CNN puede identificar con mayor precisión la ubicación y la categoría de los objetos en una imagen, a diferencia del método tradicional, el cual detecta y recupera la imagen con un marco de deficiencia considerable.

Al momento en esta sección se ha reportado una variedad de trabajos donde la visión artificial contribuye de forma notable al análisis de la variabilidad del movimiento tanto de registros de video como de imágenes, permitiendo monitorear a los jugadores durante los entrenamientos y competiciones para que, con el procesamiento de los datos, se pueda ir un paso más allá en la evaluación de los ejercicios ejecutados [31]. También, tiene gran importancia el avance tecnológico de los dispositivos usados para la adquisición de los registros, pues de su desempeño depende considerablemente la reconstrucción 3D dentro del estudio en distintas variables en las que es posible realizar el seguimiento de los jugadores, optimizar el entrenamiento y reforzar la supervisión de los gestos y movimientos ejecutados por el deportista [25].

Es importante notar sobre las bondades de las técnicas basadas en registros de imágenes (las cuales se asemejan a las basadas en registros de video en cuanto a la precisión en la estimación tanto de las fortalezas y debilidades como de la mejora del rendimiento de cada uno de los jugadores, minimizando el costo y maximizando la facilidad en el uso [26], y según la aplicación), que pueden llegar a ser más convenientes por el uso de comparación de plantillas, vectores y algoritmos de computación avanzada como PSO y SVC, con los cuales se extraen las coordenadas de la imagen asociadas con los puntos de medición y restauración [28]. Así, estos sistemas se convierten en un aliado de soporte de decisión para cualquier entrenador, debido a que el apoyo que se provee desde la inteligencia computacional para estudiar, analizar y examinar cualquier movimiento o destreza es de gran ayuda al momento de entrenar y preparar atletas para las competencias de alto rendimiento [32].

7.4.3 Procesamiento de la recolección de datos

Se ha propuesto el uso de redes neuronales de memoria a corto y largo plazo (LSTM) con un operador algorítmico bioinspirado (BIA) para el procesamiento de datos recolectados durante ejecuciones deportivas. Estas herramientas realimentan los entrenamientos con el reconocimiento de movimientos, con el fin de analizar, guiar, evaluar y mejorar cada vez más las prácticas, pues las rutinas de detección automatizada de señales durante la actividad física permiten el hallazgo de inconvenientes físicos indirectos, independientemente de la escala y la resolución. En [33] se propone el uso de un esquema LSTM-BIA para modelar acciones predefinidas mediante el seguimiento de las actividades físicas con señales temporales discriminativas. Los resultados mostraron alta precisión en el reconocimiento de movimientos predefinidos, la relación de predicción, recuperación y rendimiento en comparación con otros métodos que involucran más costo de cómputo.

En cuanto a la gestión de datos mediante dispositivos IoT (i.e., tecnología de internet de las cosas, por sus siglas en inglés) portátiles y novedosos, en [34] se reporta el uso de una unidad de medida inercial (IMU) con dos mecanismos de detección de inercia ubicados en las muñecas y tobillos de los jugadores de baloncesto, conectados a una red inalámbrica para la transferencia y almacenamiento de información durante las actividades en tiempo real. Se obtuvo una alta tasa de éxito en la identificación de actividades en baloncesto como regates y pases, entre otros, por lo que, por medio de los datos recopilados con el dispositivo, los entrenadores pudieron determinar los movimientos de los deportistas, confirmando que el sistema es una herramienta confiable de soporte de toma de decisiones durante los entrenamientos.

En cuanto al análisis de los movimientos deportivos para la evaluación, diagnóstico y control de las metodologías atléticas

(valiéndose de estudios teóricos y empíricos del comportamiento biomecánico y modelado estadístico-matemático), se presenta un estudio para el análisis de la variabilidad de la técnica IADOV en el lanzamiento de disco, tomando registros de jóvenes de 15 años [12]. Los resultados evidenciaron que solo dos parámetros mostraron alta variabilidad en los nueve lanzamientos efectuados, los cuales están contenidos dentro de los parámetros cinemáticos: velocidad y aceleración inicial del ataque y la contribución para evaluar y determinar la velocidad del jugador al lanzar los discos. El resto de los parámetros mostró una desviación estándar menor y, por tanto, poca variabilidad en los movimientos.

En [35] se propone la predicción y análisis mediante el modelado ajustado con técnicas de inteligencia artificial, utilizando una estructura de base de datos estándar confiable para el reconocimiento de acciones durante la ejecución de movimientos. Este trabajo comparó el método de regresión lineal con la regresión bayesiana, encontrando que esta última mostró mayor nivel de precisión en el reconocimiento de acciones deportivas, tanto en los entrenamientos como en las competiciones.

Ahora bien, la integración de diversos mecanismos de inteligencia artificial, como las redes neuronales LSTM, con dispositivos de detección de inercia y los métodos teóricos y empíricos, contribuye a una inferencia más detallada de la antropometría del deportista, del consumo energético, la actividad eléctrica muscular y la cinemática de los segmentos anatómicos y articulaciones involucradas en las actividades deportivas [36].

7.5 Estimación de postura

La postura corporal se define como la posición en la que se mantiene el cuerpo o un segmento de este en relación con la gravedad

[37]. Existen dos tipos: la primera es la postura dinámica, cuando la persona está en movimiento; la segunda es la postura estática o postura corporal sin movimiento [38]. Se han adelantado estudios sobre la postura en el deporte, donde se reporta que «mantener una postura determinada es esencial al momento de realizar actividades relacionadas con la vida diaria, así como en la realización de un gesto o actividad deportiva» [39]. Por esta razón, cuando se habla de la estimación de postura corporal en actividades deportivas, se refiere principalmente a la captura y análisis de las articulaciones y el movimiento del cuerpo mediante técnicas de visión por computador, utilizando una imagen o una secuencia de imágenes [40].

En efecto, la importancia que tiene la estimación de posturas en el ámbito del deporte es notable, por la necesidad de ejecutar y mantener una correcta alineación de las articulaciones, pues los músculos tienen que hacer un sobreesfuerzo para conseguir el correcto movimiento sobre las articulaciones [2]. Además, la adecuada postura de la columna vertebral será la única manera en que los deportistas trabajen apropiadamente los denominados músculos del *core*: abdominales, músculos pelvitrocantéreos y estabilizadores de la columna y la pelvis, entre otros, los cuales son clave para la buena ejecución de cualquier deporte [41].

De esta manera, conociendo las limitaciones estructurales de los individuos, se pueden diseñar con argumentos técnicos los planes de trabajo con el principio de individualización. Por otro lado, también sirve como punto de partida para comparar futuras estimaciones y contrastar las mejoras producidas en el entrenamiento, sin riesgo de estresar o sobrecargar ninguna estructura muscular, logrando un mejor desempeño en las competencias.

7.5.1 Estimación de postura por visión 3D

Se han propuesto sistemas para el análisis del desempeño técnico-táctico de deportistas que posibiliten una ruta de aprendizaje para los practicantes, donde las capturas de imagen frontal y lateral del movimiento permitan la reconstrucción de registros de visión 3D, con el fin de estudiar variables de bajo costo y de fácil procesamiento. En [42] se diseñó un algoritmo para la estimación de las posiciones articulares de jugadores de voleibol, en función de su evolución y el análisis comparativo de las posturas y gestos, además del análisis cualitativo y cuantitativo de los deportistas para identificar sus fortalezas y deficiencias por medio de los dispositivos Kinect y Vicon.

Los resultados demostraron que el dispositivo Kinect permitía caracterizar de mejor manera el análisis de las posturas de los deportistas, mientras los resultados antropométricos no mostraron suficiente precisión con relación a los obtenidos usando Vicon. En cuanto al reconocimiento de actividades grupales desde los deportes colectivos (*C-Sports*) [43] se consideraron aquellos como el baloncesto, *dodge ball*, *hockey* sobre hielo o waterpolo, en los que se emplearon tres modelos de reconocimiento de última generación para la identificación de puntos de referencia, los cuales están basados en las siguientes estrategias de aprendizaje profundo:

1. ConvNets con LSTM,
2. Two-Stream ConvNets, y
3. 3D ConvNets.

A partir de los resultados experimentales, se observa que, si bien las categorías deportivas desde los videos pueden ser inferidas con notable precisión, todavía hay margen de mejora para

el reconocimiento de la actividad colectiva, especialmente en lo que respecta a la capacidad de generalización.

En cuanto a posturas deportivas al aire libre, en [44] se presenta un conjunto de datos de video denominado 3D ASPset, el cual contiene anotaciones que permiten la identificación y predicción automática de las ubicaciones correspondientes a las articulaciones humanas en 3D, con áreas de aplicación en la interacción humano-computadora.

Los autores proponen una metodología de visión artificial, flexible y de bajo costo, que permite la captura de puntos característicos 3D, a fin de alimentar modelos de estimación de posturas utilizando solamente tres cámaras de video. Los resultados de proyección en las articulaciones muestran que, con la inclusión de datos de entrenamiento complementarios (i.e., ASPset-510), se logra un porcentaje de precisión superior al 20 %.

No obstante, quedan abiertas posibilidades de investigación orientadas a un mayor aprovechamiento de los datos para la construcción de modelos de estimación de postura que exploten el contexto temporal de secuencias continuas de imágenes. En [45] se presenta una revisión de algoritmos para la estimación de posturas en 3D, cuando los movimientos no cuentan con los correspondientes marcadores. Se adoptaron tres criterios principales para la evaluación de los algoritmos: precisión, velocidad y robustez, a fin de clasificar los métodos y definir campos abiertos para futuras investigaciones, en términos de costo computacional, operaciones y ejecuciones en tiempo real, arquitecturas de *hardware* menos costosas, reducción en el consumo de energía y facilidad de uso.

En general, la visión 3D permite especificar y determinar con exactitud las posiciones articulares y los grupos musculares

ejercitados por el deportista, con el objetivo de examinar las variables involucradas en cada actividad, ya sea en los entrenamientos o en las competencias, logrando así tanto la generación de un reporte de eficiencias y deficiencias del individuo como la evolución y progreso que va logrando [46].

7.5.2 Estimación de postura por visión 2D

El desarrollo de sistemas de evaluación de postura en función del rendimiento en actividades deportivas requiere de estimaciones altamente precisas de las articulaciones sobre el esqueleto del jugador. Uno de los enfoques frecuentes en la literatura corresponde al reconocimiento de acciones basadas en esqueletos 2D, donde las posturas se estiman a partir de imágenes regulares RGB en lugar de procesar imágenes de profundidad, que son mucho más costosas.

En [47] se presenta un reporte sobre la estimación de posturas humanas basadas en esqueletos 2D y sus aplicaciones en el reconocimiento de acciones, donde se identifican desafíos abiertos en la comunidad científica asociados a las fallas que se presentan al diferenciar un deportista entre otras aglomeraciones en el registro de la imagen y el costo computacional para lograrlo. En [48] se propone el reconocimiento de posturas desde registros RGB-D, usando técnicas de procesadores multinúcleo, un nuevo enfoque de suavizado laplaciano 2D y un método de detección de bordes basado en el algoritmo de Canny para pruebas de natación.

Los resultados demuestran que el procesamiento paralelo permite potenciar adecuadamente los algoritmos, mejorando la eficiencia por medio de la escalabilidad del *hardware* y abriendo nuevos caminos de progreso en esta área de conocimiento en pro de nuevas herramientas de apoyo al rendimiento deportivo.

Así como en los enfoques basados en visión 3D, la visión 2D permite la estimación de posturas, pero de una forma más compleja debido a que no solo se evalúan las articulaciones, sino el contexto mecánico-esquelético que se deriva del esqueleto 2D reconstruido desde imágenes regulares RGB, integrando rutinas de optimización con técnicas de procesamiento multinúcleo.

7.5.3 Estimación de postura mediante la colección de datos de sensores

La estimación automatizada de postura en deportistas puede lograrse no solamente desde registros de imagen o video durante las actividades deportivas, sino también desde los datos recolectados de los sensores que son incluidos en las prendas de vestir o como dispositivos complementarios de referenciación o medición de desempeño.

- **Sensores de inercia.** Estos dispositivos son capaces de medir la aceleración lineal y la velocidad angular; son útiles en el área deportiva para la cuantificación y valoración objetivas del movimiento corporal y la ejecución postural de los deportistas, permitiendo análisis en tiempo real, tanto en terreno como en agua [49]. Se reportan adaptaciones a deportes de todo tipo como fútbol americano, natación, tenis, golf, atletismo, baloncesto, béisbol, *cricket*, salto largo y levantamiento de pesas, entre otros.

En [50] se propone un modelo de aprendizaje profundo de atención de compuerta convolucional comprimida (SCGA) para la identificación de posturas, para ejecuciones de tiro en baloncesto, que integra una fusión de sensores inerciales que conforman el conjunto de datos de procesamiento. Los resultados experimentales se obtuvieron con 10 tipos de

conjuntos de datos correspondientes a posturas de tiro en baloncesto, logrando una tasa de precisión promedio del 98.79 %, una tasa de recuperación promedio del 98.85 % y un valor kappa de 0.9868, lo que evidencia una mejor estabilidad, confiabilidad y consistencia.

- **Sensores de imagen multimodal.** Las interfaces humano-máquina (HMI) basadas en el reconocimiento de gestos han sido aplicadas ampliamente en juegos de realidad virtual, sistemas de medicina remota y control deportivo; ahora, la combinación del empaquetamiento de datos mediante redes inalámbricas con las aplicaciones deportivas ha permitido la explotación de muchas más bondades, pues se utilizan las imágenes multimodales y los sensores de reconocimiento de voz para mejorarlos considerablemente, en especial cuando se trata de posturas o señas con partes del cuerpo que interactúan como la mano y el brazo, muy empleados en el deporte.

En [51] se propone un método basado en la fusión de características de múltiples modelos para la identificación de posturas en el control deportivo, integrando la técnica de imagen multimodal. Se aprovecha el sensor Kinect para una transmisión de video en tiempo real, a fin de inferir las posturas de la mano y los movimientos del brazo con información de color y profundidad, usando una plataforma de robot cuadrúpedo con manipulador e interfaz de audio para mejorar el procesamiento y ejecución de las acciones predefinidas. El resultado expone que, en comparación con métodos tradicionales, los nuevos enfoques logran una mejora en rendimiento y precisión según los objetivos establecidos.

7.5.4 Estimación de postura por procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes corresponde a la aplicación integrada de familias de técnicas que, como entrada, usan imágenes digitales a fin de mejorar la calidad por medio de métodos de filtración o de facilitar la búsqueda de información mediante segmentación o diversos operadores de representación. En [52] se propone un algoritmo para la segmentación de imágenes en movimiento con un enfoque denominado modelos mixtos gaussianos por conjuntos de niveles (GMMLS), donde se requiere, inicialmente, reducir el ruido de la imagen para luego incluir un operador de umbral multinivel basado en los modelos mixtos gaussianos en el proceso de segmentación y, finalmente, la extracción de características orientada a la clasificación de las imágenes en movimiento. Los resultados muestran que el algoritmo proporciona una segmentación rápida de alta calidad perceptiva mientras se mueve la vista dividida de la imagen.

En [53] se propone un modelado de imágenes deportivas con un método denominado de aprendizaje débilmente supervisado, dado que no exige el uso de anotaciones del cuadro delimitador, y su eficacia es demostrada solamente con las etiquetas en el nivel de imagen. Para los resultados experimentales, se usó un esquema de redes neuronales convolucionales (CNN) con el fin de extraer representaciones de profundidad y se diseñó un algoritmo mejorado de análisis discriminante múltiple (MDA) para proyectar estos puntos en un subespacio que permitiera distinguir de manera eficaz las diferentes posturas deportivas en movimiento.

La alineación postural de atletas con discapacidad visual es uno de los retos que ha requerido asistencia computacional. Para este campo, en [54] se presenta un estudio enfocado en proporcionar una descripción fotogramétrica computarizada de la alineación

espacial de los segmentos del cuerpo de atletas con discapacidad visual, contando con la participación de veintiséis sujetos, a quienes se les pidió que se pararan con pelotas de espuma de poliestireno en puntos de referencia anatómicos seleccionados y cuatro puntos de adquisición, para una descripción fotogramétrica computarizada adecuada en función de la alineación de la postura. En la evaluación postural, se siguieron las recomendaciones del postural assessment software (PAS/SAPO) para los protocolos del análisis cuantitativo de los ángulos y las distancias del cuerpo.

También se han reportado estudios enfocados en el reconocimiento de posturas características, una herramienta efectiva para el análisis de competencias y entrenamientos por parte de entrenadores, atletas y otros profesionales del deporte. En [55] se presenta un método de reconocimiento de posturas características basado en aprendizaje profundo con aplicación al levantamiento de pesas, donde la postura es relevante para la validez de los logros.

El método se inicia con la segmentación y seguimiento del objetivo, junto con las características individuales del atleta, para luego procesar y muestrear la imagen global, a fin de clasificar si la postura es correcta o desviada de lo normal. Se propone el entrenamiento de una red convolucional completa (FCN) para eliminar gran parte de la interferencia de fondo en las imágenes de video y el uso de una red neuronal convolucional (CNN) para el ajuste fino en la clasificación del video, peso por peso, de la región de interés. El algoritmo pudo seleccionar fotogramas de posturas características de alta calidad, demostrando su efectividad y eficacia.

En [56] se presenta un sistema de procesamiento de imágenes adquiridas en juegos de baloncesto en el que se propone un marco de estabilización global de video utilizando dos cámaras computarizadas de alta tecnología ubicadas en el techo del espacio

de juego a fin de lograr la representación de toda la geometría del lugar. Los resultados demuestran un importante margen de factibilidad y confianza en la identificación de posturas dentro de los juegos de baloncesto, pues esta herramienta de visualización de posturas se convierte en algo atractivo para los fanáticos y seguidores de este deporte.

En general, el procesamiento de imágenes deportivas se constituye en un método de bajo costo, escalable, transferible y de alto valor técnico-deportivo para la captura de transformaciones posturales, posibilitando, además, el análisis de posturas características de alta calidad, lo cual ayuda al progreso en el entrenamiento competitivo y el logro de altos niveles de desempeño [57].

7.5.5 Otros enfoques computacionales

El esfuerzo físico y psicológico de los deportistas para alcanzar niveles de alto rendimiento exige complementariamente características antropométricas asociadas con la longitud de las piernas, la estatura, la longitud de los pies, la longitud de los brazos, la longitud de las manos, el ancho de los hombros, el ancho de la cadera, el ancho del pecho, el peso, entre otras, las cuales tienen incidencia directa en el desempeño atlético competitivo. Entre otros enfoques, en [58] se proponen dos algoritmos de cómputo para seleccionar nadadores jóvenes en función de sus características antropométricas.

El primero corresponde a una etapa de filtración basada en el algoritmo de Canny, mientras que el segundo se basa en conceptos fuzzy, con los cuales se extraen 101 puntos característicos de imágenes frontales y laterales del cuerpo humano, con los que se infieren automáticamente 36 mediciones corporales. Los resultados experimentales se obtuvieron de 15 niños con edades

alrededor de los 12 años; el algoritmo seleccionó a 4 nadadores junior prometedores con mediciones antropométricas ideales.

En [59] se presenta una metodología de medición y comparación de los efectos de los ejercicios de fatiga en las extremidades inferiores unilaterales y bilaterales realizados con la misma carga de trabajo relativa en las medidas de estabilidad postural basadas en COP (centro de presión) durante la postura tranquila y las medidas APA/CPA (ajuste postural anticipatorio/ajuste postural compensatorio) basadas en señales electromiográficas (EMG) durante la perturbación autoiniciada, usando rutinas avanzadas de cómputo. Los resultados de este estudio sientan las bases para examinar los efectos de la condición de fatiga en el control postural, puesto que los ejercicios fatigantes unilaterales o bilaterales repetitivos en pacientes o atletas pueden alterar el componente anticipatorio del control postural.

En [60] se expone un algoritmo de fusión de características multimodales, logradas desde la función visual, la postura del esqueleto, los mapas de probabilidad y la señal de audio en una ocupación híbrida, que se utilizó para representar la acción humana. La función fusionada de manera óptima alimentó a una máquina de soporte vectorial (SVM) de varias clases para efectuar el reconocimiento de posturas y acciones humanas, demostrando efectividad y solidez.

Para cualquier deportista es de vital importancia reconocer las debilidades y fortalezas que tiene frente a la actividad que realiza, pues con esto puede realimentar efectivamente sus rutinas de entrenamiento en función de lograr altos niveles de rendimiento. Asimismo, la valoración de sus características morfológicas le ayuda a llevar control de los factores antropométricos que limitan su competitividad, además de aportar a su monitoreo nutricional [61]. Así, el empleo de nuevos enfoques computacionales

que ayuden a estimar los datos relacionados con la composición corporal contribuye en gran medida a que el atleta pueda sacar el mayor provecho de sus posibilidades, minimizando los efectos de las desviaciones individuales de acuerdo con los rangos óptimos para la modalidad deportiva.

7.6 Análisis biomecánico

El concepto de biomecánica se relaciona con el estudio de la mecánica aplicada al cuerpo humano, a fin de evaluar el estado y evolución de una lesión o una patología musculoesquelética y valorar la eficacia del tratamiento o terapia de rehabilitación con pruebas dinámicas [62]. Una de las ramas de mayor importancia de la biomecánica es la deportiva, que tiene como objetivo analizar el movimiento a partir de principios físicos, mecánicos, anatómicos y fisiológicos; con esta se busca comprender cómo se mueven los individuos en una praxis deportiva [63].

Se puede señalar, entonces, que el análisis biomecánico es un elemento importante para el éxito de un deportista, puesto que se enfoca en apropiar modos más precisos en la mejora del rendimiento, así como desarrollar técnicas de entrenamiento capaces de imitar a otros organismos que en la naturaleza superan el esfuerzo físico humano, a fin de adoptar nuevos principios físico-mecánicos dentro de las ejecuciones clave [64]. El análisis biomecánico en el ámbito deportivo requiere del uso de sistemas tecnológicos para recoger datos, analizarlos y estudiar el movimiento, el equilibrio, la resistencia o fuerza de los tejidos y músculos al andar, correr o estar en una posición determinada, a fin de optimizar el rendimiento [4].

El análisis biomecánico se fundamenta en datos específicos del individuo y el contexto, y en el análisis de los factores de riesgo

que se relacionan con el esfuerzo en los espacios de trabajo que pueden provocar el desarrollo de trastornos musculoesqueléticos [65]. En [66] se presenta un enfoque novedoso mediante el uso de un sistema de presión de plantilla portátil y modelos de redes neuronales recurrentes (RNN) para la extracción de características biomecánicas y la clasificación secuencial de datos, a fin de identificar diferentes tipos de posturas peligrosas. Los resultados permitieron el reconocimiento y clasificación con una precisión del 99 %. En [67] se propone la evaluación de la confiabilidad de Microsoft Kinect™ como una herramienta de análisis biomecánico para la evaluación inicial de postura de columna, con el fin de abordar el dolor lumbar y las consecuencias que se hallan en la alineación sagital subóptima, la cual se ve comprometida con frecuencia.

7.7 Predicción de lesiones deportivas

Con ayuda del procesamiento de los datos recolectados y el desarrollo matemático aplicado mediante algoritmos especializados, es importante estimar aquellos indicadores que permiten una estimación precisa del rendimiento total de los jugadores, como es la velocidad media y máxima, intensidad y repeticiones para cada técnica, la distancia recorrida, parametrización de los gestos deportivos y parametrización de las posturas, con el fin de prevenir lesiones [25]. Con esto, los deportistas pueden realimentar sus entrenamientos valiéndose de índices numéricos que informan sobre movimientos y postura que, en caso de no corresponder a los adecuados, ayudan a proyectar acciones de mejora, al tiempo que se reducen las posibilidades de sufrir daños en la salud [26].

7.7.1 Predicción de lesiones deportivas con video

Clásicamente, se ha definido que la prevención de las lesiones en el deporte depende de factores internos del propio deportista como la edad, el sexo o la nutrición, y factores externos como la temperatura ambiente, tipo de calzado, superficie o terreno de juego, entre otros. En la actualidad, ambos son igualmente importantes; el uso de la inteligencia computacional y la visión artificial sobre registros de video ayudan a la parametrización de todos estos factores en función de la predicción de lesiones deportivas, utilizando las bondades del Machine Learning.

En [68] se propone una simulación de riesgo de lesiones deportivas con asistencia por computador, basada en un sistema integrado de imagen para predecir el movimiento de lesiones musculoesqueléticas, de manera que se pueda determinar el riesgo de daño. Este estudio consistió en una cámara de integración tecnológica que desarrolla el procesamiento de imágenes o el reconocimiento de posturas de forma continua y en alta resolución. Los resultados demostraron la capacidad de la propuesta para identificar las lesiones más comunes del entrenamiento físico como el tirón y tensión muscular, el tobillo torcido, lesión en el hombro y las lesiones de rodilla. Asimismo, se pudieron definir el impacto del trauma en diferentes tipos (agudo, continuo, abuso e intermitente) y el progreso en la recuperación de estas.

En [69] se presenta una cuantificación *in vivo* de la tensión del ligamento cruzado anterior (LCA) mediante simulación por computadora, donde se incluye un modelo biomecánico basado en marcadores y un modelo de geometría esquelética. Para este estudio, como entrada se utilizaron los datos cinemáticos recopilados por un sistema de captura de movimiento, y como salida la tensión del LCA durante el período de movimiento. En el experimento, se llevaron a cabo estudios para simular la tensión

del LCA durante las actividades de aterrizaje con salto, carrera y corte lateral. Los resultados fueron analizados y comparados con hallazgos previos en la literatura, demostrando que la simulación resultó útil para comprender los mecanismos de lesión del LCA relacionados con las actividades deportivas.

En [70] se discute acerca de los efectos de las tareas cognitivas visuales sobre la estabilidad en el aterrizaje y el riesgo de lesiones en las extremidades inferiores en jugadores de fútbol de alto rendimiento, por lo que se propone una tarea de seguimiento de objetos múltiples 3D (3D-MOT) para simular las dificultades cognitivas visuales. Las pruebas se aplicaron a quince deportistas masculinos de fútbol, usando un sistema de captura de movimiento infrarrojo de alta velocidad (Vicon) y una plataforma de medición de fuerza tridimensional para la recopilación de datos, simultáneamente. Los resultados mostraron que los atletas de fútbol no desempeñaban bien el aterrizaje en condiciones de tareas duales, ya que la interferencia de las tareas cognitivas visuales cambiaba negativamente la estabilidad en el aterrizaje y la mayor demanda de equilibrio podía aumentar el riesgo de lesión.

En [71] se evalúa la biomecánica de los accidentes ecuestres y se logra el establecimiento de umbrales para la ocurrencia de lesiones por conmoción cerebral. En este estudio, se usaron 25 caídas con conmoción cerebral y 25 sin esta, las cuales fueron reconstruidas usando una combinación de análisis de video e inteligencia artificial. Los resultados sugirieron que los estándares actuales de los cascos ecuestres pueden no representar adecuadamente las condiciones de impacto de conmoción cerebral y, en consecuencia, está abierto en la literatura el análisis biomecánico combinado con visión artificial para la evaluación integral de la capacidad protectora de los cascos ecuestres en condiciones de uso real, a fin de nuevas propuestas de protección.

7.7.2 Predicción de lesiones deportivas sin video

La predicción de lesiones deportivas mediante colecciones de datos procesados con la integración de algoritmos avanzados de análisis multivariado y visión artificial sin video se traduce en una ayuda importante en el desempeño de un atleta, puesto que es posible realizar el análisis de interrelación que existe entre las cargas de entrenamiento, la fatiga acumulada, la discordancia entre las cargas prescritas y percibidas, y su influencia en la aparición de lesiones [72]. Es así como la aplicación de nuevas tecnologías basadas en sensores IoT, captura de registros de movimiento, arquitecturas embebidas y esfuerzos de computación paralela permiten la estimación de indicadores orientados a determinar cuáles son las lesiones más comunes y fuertes en los diversos deportes, beneficiando la protección de la salud de los deportistas, la potenciación del rendimiento y la reducción de trastornos músculo-esqueléticos, de manera que, si se puede prevenir cualquier tipo de lesión, el avance tecnológico contribuye ostensiblemente al progreso del deporte, sin comprometer el bienestar integral de los deportistas [73].

En [74] se analizan las características anatómicas de las articulaciones de rodilla en deportistas de artes marciales; se incluyen la mecánica de las lesiones y los cambios fisiopatológicos después de cada lesión por medio de un modelo matemático y un algoritmo computacional para percibir con precisión la calidad de la imagen, y se propone el uso de la inteligencia artificial en lugar de la visión humana. Se usó la tomografía computarizada para evaluar los cambios fisiológicos y metabólicos de los tejidos en estado vivo, a modo de imagen funcional con diagnóstico cuantitativo multiparamétrico. Este análisis sugirió que las lesiones deportivas en diferentes articulaciones se distribuyen

principalmente en las áreas de carga local excesiva, acciones técnicas incorrectas y actividades de preparación inadecuadas.

En [75] se proponen estrategias de carga y monitoreo de datos para validar la identificación de lesiones en deportistas mediante aprendizaje automático jerárquico y un sistema integrado de predicción. Las pruebas se hicieron sobre información recolectada de 21 jugadores de fútbol de varias fuentes (carga interna, carga externa y revisiones de control), la cual se fusionó para que los datos permitieran capturar un mayor cubrimiento de estados, a fin de lograr más capacidad de representación. Los resultados experimentales mostraron desempeños adecuados para la predicción de lesiones, lo que podría aplicarse a otros deportes para probar la estabilidad y robustez del algoritmo.

En [76] se revisa la literatura para identificar atributos relevantes y correlacionados con las lesiones, además de cuantificar el impacto en el rendimiento del jugador y del equipo, usando máquinas de aprendizaje. Se utilizaron datos extraídos de la Asociación Nacional de Baloncesto (NBA) de Estados Unidos en el período comprendido entre 2010 y 2020. Se encontró que existe una relación positiva débil entre el rendimiento y las lesiones con base en un modelo holístico multivariado, donde las deficiencias musculoesqueléticas, además de ser las más comunes, son las de interferencia notable en el rendimiento individual y grupal.

Se han reportado sistemas de simulación para la predicción de lesiones deportivas basados en tecnologías de internet de las cosas y sensores inalámbricos. En [77] se presenta una propuesta de evaluación de riesgos en el bádminton, usando un sensor inalámbrico compuesto de un sistema microelectromecánico integrado a un sensor de movimiento para identificar el estado técnico de los jugadores en cuanto a la ejecución de los golpes y confirmar su eficacia.

Los resultados señalan que la evaluación tradicional tiende a ser muy subjetiva y poco detallada, mientras que los sistemas basados en sensores e inteligencia computacional pueden proporcionar información muy precisa de aceleración y velocidad de rotación, las cuales son variables altamente correlacionadas con movimientos de alto riesgo de lesión.

En [32] se propone un sistema de simulación para la predicción de lesiones deportivas basado en arquitecturas embebidas y redes neuronales, donde se usan datos históricos de varios sistemas de información que predijeron lesiones por movimiento en función del daño. Los resultados logrados con el sistema propuesto alcanzaron un nivel de clasificación del 96 %, un nivel de precisión de lesiones deportivas del 93 % y un nivel de recuperación del 96 %.

En [65] se identifican el máximo nivel teórico alcanzable y la frontera de seguridad en una tarea física repetitiva, y se plantea el desarrollo de un modelo de predicción de riesgo para estimar el momento lumbar ejercido en cada cuadro de movimiento. Se usó una cámara con un sensor de profundidad Kinect para la toma de datos de la postura. Los resultados entregan información para mejorar estrategias de seguridad al proporcionar un punto de referencia de seguridad más alto en el monitoreo de las actividades físicas.

En general, se encuentra que las lesiones son frecuentes en deportes de equipo en los que se desarrollan movimientos bruscos y repetitivos como atletismo, fútbol o baloncesto [78]; por eso, se deben desarrollar estrategias de prevención y mitigación de riesgos de lesiones deportivas con estructuras soportadas en datos, algoritmos computacionales y arquitecturas flexibles [79].

En efecto, la integración de sensores de última generación con gestión de información en la nube, inteligencia computacional

y arquitecturas de desarrollo robustas, orientada a la predicción de lesiones, se convierte en una herramienta esencial dentro de cualquier actividad en el entrenamiento deportivo, ya que la estimación en línea de factores que elevan el riesgo de lesiones deportivas es un gran insumo para los entrenadores, sin desconocer que también hay elementos que predisponen a los deportistas hacia esas lesiones [80].

Comúnmente, se tiende a pronosticar el riesgo de manera rutinaria desde soluciones obtenidas de los sistemas dinámicos; sin embargo, los esfuerzos de cómputo ofrecen evaluación del riesgo y predicción de aparición de lesiones de manera precisa y robusta, según hayan sido los escenarios de adquisición de los datos [81].

7.8 Integración de algoritmos y nuevas tecnologías

El crecimiento exponencial de la ciencia y la tecnología en el campo deportivo hacen que cada vez existan más integraciones de mecanismos, programas, herramientas, aplicaciones, algoritmos, sensores y muchos enfoques de *hardware* y *software* que propenden por el control de la salud de los deportistas, así como la mejora en su rendimiento competitivo.

Entre otros, se reportan la integración de técnicas de visión estéreo binocular con redes de sensores inalámbricos [25], el procesamiento de gráficos basados en acción y postura [26], los sistemas de visión artificial multiperfil [42] y el reconocimiento de actividades colectivas mediante redes de sensores magnéticos e inerciales [43]. Algunos de ellos son beneficiosos para monitorear la actividad deportiva, pero otros todavía poseen ciertas fallas o defectos que los hacen imprecisos para el análisis de determinados movimientos y posturas.

En [82] se propone la aplicación de un método para el reconocimiento de actividades deportivas mediante técnicas de clasificación y sensores portátiles; con este, se busca informar al atleta sobre su vida diaria en relación con su actividad física. En este sentido, se expone un análisis comparativo de diferentes técnicas de clasificación de datos obtenidos de sensores magnéticos e inerciales que el jugador lleva en el cuerpo. Los algoritmos utilizados para la comparación fueron árboles de decisión, clasificador de potenciación del gradiente, clasificador *bagging*, clasificador de bosque aleatorio, clasificador por árboles, k vecinos más cercanos (KNN), máquinas de soporte vectorial (SVM), redes neuronales y algunas variantes.

Los resultados demuestran que tanto los sensores colocados en la mano derecha, mano izquierda, torso, pierna derecha y pierna izquierda como los datos de las cámaras aumentan las posibilidades de caracterización y la capacidad de los espacios de representación para mejorar las fronteras de decisión de los sistemas inteligentes, lo que incrementa la confiabilidad de los resultados.

7.9 Consideraciones finales

La literatura revisada sobre el análisis de postura y movimiento en deportistas con base en procesos computacionales permite demostrar que la inteligencia artificial contribuye a que los atletas puedan conocer su rendimiento y reducir las probabilidades de sufrir alguna lesión con la información recolectada de sensores de respiración, ritmo cardíaco o niveles de esfuerzo.

Los entrenadores también pueden diseñar mejores estrategias mediante el análisis de patrones asociados a posturas o movimientos en tiempo real, utilizando registros de video o secuencias de imágenes para el reconocimiento de reacciones al

lenguaje no verbal de los jugadores y determinar qué posturas se deben corregir para ganar precisión en los movimientos involuntarios. En general, se puede integrar la inteligencia computacional a los procesos deportivos con el uso de técnicas de visión artificial y máquinas de aprendizaje automático, con la información obtenida de cámaras de alta resolución o sensores de tecnologías convergentes que permitan examinar y reconocer los puntos característicos involucrados en la efectividad de posturas y movimientos.

La comunidad científica ha reportado con frecuencia estudios donde se evidencia que la variabilidad de movimiento es uno de los aspectos con mayor incidencia al error, resultando en valores de precisión alrededor del 80 %, dada la presencia de turbulencia en las imágenes o zonas borrosas que impiden que los algoritmos de procesamiento puedan imponer restricciones desde los espacios de representación.

Este problema es común en la etapa de entrenamiento cuando se tiene capturado el conocimiento de los entrenadores expertos para evaluar los movimientos de los jugadores. También, el procesamiento computacional del movimiento humano requiere el procesamiento automático de señales electrofisiológicas durante la actividad física, de manera que las rutinas del entrenamiento de las máquinas de aprendizaje permitan visibilizar posibles problemas físicos indirectos independientemente de la escala y la resolución de las imágenes. De esta manera, existen altas oportunidades de investigación relacionadas con el tratamiento en tiempo real de imágenes con zonas borrosas o turbulentas y la creación de nuevas alternativas para la mitigación del ruido electrofisiológico, a fin de lograr mayor robustez y confiabilidad en los resultados.

Cabe resaltar que la estimación de postura en 2D y 3D proporciona posibilidades reales de captura del análisis de las articulaciones y movimiento del cuerpo, gracias a las técnicas de visión por computador, contribuyendo a la mejora de la condición de vida y salud de un deportista con reportes de logro de hasta un 90 %. Igualmente, los sensores tanto de inercia como multimodal en este contexto poseen un significativo nivel de estabilidad y confiabilidad, lo que ayuda a reconocer los movimientos técnicos deportivos, sobre todo en escenarios donde se debe medir la velocidad de los jugadores y analizar en tiempo real sus movimientos en campos de mayor dificultad como en la adquisición de los datos dentro del agua.

En este documento se discute acerca de los eventos adversos evitables con el uso de sistemas automatizados por inteligencia computacional con video y sin video, puesto que se reportan logros asociados con la disminución del índice de ruido en el fondo de las imágenes, hasta cierto punto, como también la reducción significativa de ambigüedad en el reconocimiento de gestos de los jugadores, hasta un 70 %, mediante el uso de cámaras lineales, matriciales, de alta velocidad y 3D.

En cuanto al empleo de algoritmos para la predicción de lesiones deportivas con video y sin video, se analizan los movimientos bruscos y repetitivos en actividades de contacto como el atletismo, el fútbol o el baloncesto, alcanzándose niveles de precisión hasta el 96 %. No se puede descartar que, en la mayoría de los casos, una mala praxis conduce a desórdenes musculoesqueléticos, los cuales pueden ser valorados en las imágenes deportivas, exigiéndose la adopción de técnicas como las de aprendizaje profundo para servir de soporte a la predicción de problemas de salud en el individuo.

Asimismo, los algoritmos para la estimación de las imágenes deportivas suministran valores sujetos al ajuste de los parámetros asociados con la segmentación rápida, mediante el uso de modelos mixtos gaussianos (GMMLS), el análisis discriminante múltiple (MDA) y el postural assessment software (PAS/SAPO). Así, la inteligencia computacional ayuda a prevenir eventos adversos relacionados con el desarrollo de trastornos musculoesqueléticos, entre ellos el vinculado al análisis biomecánico, uno de los más significativos, ya que utiliza sistemas de reconocimiento y clasificación automática de los diferentes tipos de posturas en deportistas. En efecto, la biomecánica ha evidenciado ser de gran ayuda para obtener la exploración del rendimiento humano de gestos deportivos, en especial, cuando se emplean las redes neuronales recurrentes (RNN) con aprendizaje profundo, debido a su precisión del 99 %.

7.10 Conclusiones

Este capítulo discute sobre métodos y aplicaciones de la inteligencia computacional en el análisis de posturas y movimientos en deportistas, en relación con su rendimiento y salud. En general, se encontró que la revisión del estado del arte respecto al papel que tiene la inteligencia computacional en la automatización de los procesos deportivos es amplia y desarrollada con aplicación global.

Se resaltan las bondades que tiene la aplicación de algoritmos, sensores, cámaras y dispositivos inteligentes en los escenarios donde se desenvuelven los jugadores, con el propósito de mejorar el rendimiento deportivo y contar con herramientas que ayuden a la reducción de posibles lesiones. Sin embargo, se observaron dificultades relacionadas con el ambiente atlético por la cantidad

de perturbaciones a las que se exponen los dispositivos de captura de información, lo cual exige el uso de sistemas de automatización robustos, incrementando el costo económico y de procesamiento si se quiere minimizar el riesgo de obtener resultados con baja sensibilidad, especificidad o precisión.

En este sentido, se identificaron oportunidades de mejora para el progreso tecnológico en áreas de tanta afluencia e inversión como la economía deportiva, abriendo puertas para nuevas iniciativas científicas relacionadas con posturas, movimientos y técnicas, con un nivel de expectativa considerable de precisión y exactitud en la identificación de gestos procedentes del lenguaje no verbal y desplazamientos repetitivos, mediante desarrollos de cómputo optimizados para su uso en los equipos de entrenamiento.

Esta revisión de la literatura ha permitido observar las crecientes posibilidades que tiene la integración de las nuevas generaciones de sensores (distancia recorrida, esfuerzo cardiaco, movimiento esquelético, zonas de calor en el campo y pulsaciones, entre muchos otros) con la inteligencia de cómputo en el campo del deporte, ya que es posible procesar el seguimiento progresivo de jugadores, facilitando a los entrenadores el análisis rápido de cómo se mueve cada jugador en el campo y cómo es la estructura dinámica y mecánico-esquelética del equipo, lo que se convierte en un apoyo valioso para la competitividad en el alto rendimiento.

Ahora bien, otro aspecto en el que las aplicaciones de inteligencia de cómputo juegan un papel significativo en el deporte se relaciona con la predicción de los riesgos que tienen los jugadores de sufrir lesiones en las competencias o entrenamientos deportivos, puesto que el soporte de decisión automática basado en el conocimiento de expertos brinda posibilidades predictivas sobre

las consecuencias a largo plazo de las malas posturas o movimientos repetitivos incorrectos. En este sentido, los sensores de tecnologías convergentes y las cámaras de alta resolución estáticas o soportadas en drones se integran con rutinas de reconocimiento de patrones y visión artificial para la detección de casos en los que se tienen altas probabilidades de riesgo de lesión.

En efecto, la inteligencia computacional brinda posibilidades de realimentación natural de los deportistas, pues les permite conocerse a sí mismos, con objeto de mejorar su rendimiento y mitigar el riesgo de lesiones que pueden ser evitables desde los entrenamientos, así como tomar mejores decisiones con la ayuda de los datos extraídos de los núcleos de procesamiento basados en visión artificial, ya sea con video o con secuenciación de imágenes, para optimizar resultados de entrenamiento o de competencia.

Sin embargo, quedan como campos abiertos de estudio sobre el aseguramiento de la validez de los resultados, particularmente en aquellos casos en los que no hay riqueza normativa o no hay reglamentos técnicos que sirvan de estándar para la confianza del proceso o análisis de resultados. Tal es el caso del enfoque propuesto en este artículo, en relación con el análisis de incertidumbre para aplicaciones de procesos de medición apoyadas en inteligencia de cómputo mediante sistemas de *software* de metrología (*soft metrología*) en el ámbito deportivo.

Agradecimientos

Este trabajo se hizo dentro de las actividades requeridas en el programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores de la Institución Universitaria ITM de Medellín.

Declaración de conflicto de intereses

En aras de la transparencia, se declara por parte de los investigadores y participantes del proyecto, no presentar ningún conflicto que involucrara los intereses en la realización del proyecto, durante o posterior a la realización de este, de índoles comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

Según la Resolución 008430 de 1993, del Ministerio de Salud, la presente investigación no presentó riesgos biológicos, ambientales o éticos que pudieran afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno, la sociedad o el medioambiente. Se informa que en ningún momento de la investigación se realizaron pruebas en humanos o animales y en ninguna etapa o actividad se contempló la interacción con pacientes ni la manipulación de información confidencial, puesto que los procedimientos fueron de tipo computacional sobre bases de datos especializadas y, por ende, no se estima necesario el aval de un comité de ética.

Referencias

- [1] N. Hernández y A. Flórez-Fuentes, "Computación en la nube," *Mundo FESC*, 2014. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5109245>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [2] E. Jiménez, "La importancia de la postura para los deportistas," *CMD Sport*, 2019. [Online]. Available: <https://www.cmdsport.com/fitness/entrenamiento-fitness/la-importancia-la-postura-los-deportistas/>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [3] A. Carrio Sampedro, "Algunas consideraciones éticas sobre la aplicación de la inteligencia artificial en el deporte," *Citius, Altius, Fortius*, vol. 13, no. 2, pp. 23–55, Dec. 2020, doi: 10.15366/citius2020.13.2.004.
- [4] T. W. Lu and C. F. Chang, "Biomechanics of human movement and its clinical applications," *Kaohsiung J. Med. Sci.*, vol. 28, no. 2 Suppl., pp. S13–S25, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.kjms.2011.08.004.
- [5] A. Urdampilleta, J. Sabz y R. Cejuela, "Indicadores del rendimiento deportivo: aspectos psicológicos, fisiológicos, bioquímicos y antropométricos," *EFD Deporte*, vol. 173, p. 17, 2012. [Online]. Available: <https://efdeportes.com/efd173/indicadores-del-rendimiento-deportivo.htm>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [6] S. Sáez, "Sistema de aprendizaje profundo para reconocimiento de actividades con sensores de captura de movimientos," Trabajo de Fin de Máster, Univ. de Valladolid, Valladolid, España, 2020. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/41353/TFM-G1139.pdf>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [7] W. Suárez, R. Hoyos, G. Jiménez, J. Echeverri y T. Ramírez, *Toma de decisiones en el deporte*, 2013. [Online]. Available: <http://viref.udea.edu.co/contenido/publicaciones/aprendizaje-motor.pdf>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [8] R. Fuentes Covarrubias, A. G. Fuentes Covarrubias, J. L. Fuentes Chávez y R. E. Fuentes Covarrubias, "Aplicando las tecnologías de información para la gestión de deportistas de alto rendimiento," *I+D Tecnológico*, vol. 14, no. 2, pp. 5–16, Dec. 2018, doi: 10.33412/idt.v14.2.2068.

- [9] C. Ricós *et al.*, "Variación biológica. Revisión desde una perspectiva práctica," *Rev. Lab. Clin.*, vol. 3, no. 4, pp. 192–200, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.labccli.2010.07.003.
- [10] T. Urbán, "Análisis de la variabilidad de un patrón motor ante diferentes niveles de constreñimiento," Tesis, Univ. Miguel Hernández de Elche, 2015. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=62261>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [11] R. Valldecabres, "Variabilidad de la coordinación del movimiento humano: concepto e interpretación," *Lecturas: Educación Física y Deportes*, vol. 26, no. 282, pp. 179–201, Nov. 2021, doi: 10.46642/efd.v26i282.2645.
- [12] M. L. Medina Cabrera, R. Toledo Ríos y A. B. Sánchez Oms, "Procedimiento para el análisis biomecánico de la variabilidad del movimiento en el lanzamiento de disco," *Rev. Actividad Física y Deportes*, vol. 15, no. 3, pp. 386–388, 2020. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1996-24522020000300518. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [13] V. Madrid, "Principio de la variabilidad," *Expomotricidad*, 2018. [Online]. Available: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/expomotricidad/article/view/331844>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [14] L. Fang and M. Sun, "Motion recognition technology of badminton players in sports video images," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 124, pp. 381–389, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.future.2021.05.036.
- [15] J. Acero, "Tipos de movimiento-objeto de la biomecánica del deporte y del ejercicio," *Biomecánica e Investigación Científica*, España, 2013. [Online]. Available: <https://g-se.com/blog-4-tipos-de-movimiento-objeto-de-la-biomecánica-del-deporte-y-del-ejercicio-bp-V57cfb26d194ac>. [Accessed: Aug. 02, 2022].
- [16] P. Taylor, K.-Y. Lee, R. Landeo, D. O'Meara, E. Millett, and M. Moresi, "Investigating the relationship between movement variability, skill acquisition and adaptability," *NMU Commons*, vol. 36, no. 1, pp. 73–76, 2018. [Online]. Available: <https://commons.nmu.edu/isbs/vol36/iss1/178/>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [17] B. L. Langdown, M. Bridge, and F.-X. Li, "Movement variability in the golf swing," *Sports Biomech.*, vol. 11, no. 2, pp. 273–287, Jun. 2012, doi: 10.1080/14763141.2011.650187.
- [18] T. Buszard, A. Garofolini, M. Reid, D. Farrow, L. Oppici, and D. Whiteside, "Scaling sports equipment for children promotes functional movement variability," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 3111, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-59475-5.

- [19] A. Hincapié, C. Gómez y O. Duque, "Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para el análisis biomecánico-cinemático y la medición de variables de esfuerzo físico en ciclistas," *Ing. e Innovación*, pp. 71–79, 2021. [Online]. Available: <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/rii/article/view/2635>.
- [20] F. Ma, "Action recognition of dance video learning based on embedded system and computer vision image," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 81, p. 103779, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103779.
- [21] Z. Liu, "3DSportNet: 3D sport reconstruction by quality-aware deep multi-video summation," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 65, p. 102651, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jvcir.2019.102651.
- [22] R. Zhang, L. Wu, Y. Yang, W. Wu, Y. Chen, and M. Xu, "Multi-camera multi-player tracking with deep player identification in sports video," *Pattern Recognit.*, vol. 102, p. 107260, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.patcog.2020.107260.
- [23] J. Sanabria y J. Archila, "Detección y análisis de movimiento usando visión artificial," *Scientia Et Technica*, vol. 3, no. 49, pp. 180–188, 2011, doi: 10.22517/23447214.1513.
- [24] K. Guzmán, M. Suarez, Y. Torres y J. González, "Análisis de gestos deportivos de saque con salto en voleibol usando videometría," *Rev. Científica*, vol. 43, no. 1, pp. 20–37, Dec. 2021, doi: 10.14483/23448350.18329.
- [25] H. Li and B. Zhang, "Application of integrated binocular stereo vision measurement and wireless sensor system in athlete displacement test," *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 5, pp. 4325–4335, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.02.033.
- [26] H. Shen, H. Wang, E. S. L. Ho, L. Yang, and H. P. H. Shum, "Posture-based and action-based graphs for boxing skill visualization," *Comput. Graph. (Pergamon)*, vol. 69, pp. 104–115, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.cag.2017.09.007.
- [27] T. M. O. Santos et al., "A low-cost wireless system of inertial sensors to postural analysis during human movement," *Measurement*, vol. 148, p. 106933, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.106933.
- [28] H. Lei, T. Lei, and T. Yuenian, "Sports image detection based on particle swarm optimization algorithm," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 80, p. 103345, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103345.
- [29] H. Zheng, D. Liu, and Y. Liu, "Design and research on automatic recognition system of sports dance movement based on computer vision and parallel computing," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 80, p. 103648, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103648.

- [30] W. Liu, "Beach sports image detection based on heterogeneous multi-processor and convolutional neural network," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 82, p. 103910, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2021.103910.
- [31] B. Fernández, "La variabilidad de movimiento en el entrenamiento de fuerza en los deportes de equipo," Univ. de Barcelona, 2020. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2445/173644>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [32] H. Shen, "Prediction simulation of sports injury based on embedded system and neural network," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 82, p. 103900, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2021.103900.
- [33] J. Chen, R. D. J. Samuel, and P. Poovendran, "LSTM with bio inspired algorithm for action recognition in sports videos," *Image Vis. Comput.*, vol. 112, p. 104214, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.imavis.2021.104214.
- [34] N. H. Abdallah, R. Brahim, Y. Bouslimani, M. Ghribi, and A. Kaddouri, "IoT device for athlete's movements recognition using inertial measurement unit (IMU)," in *Proc. 2021 IEEE Int. Conf. Ind. 4.0, Artif. Intell., Commun. Technol. (IAICT)*, Jul. 2021, pp. 109–114, doi: 10.1109/IAICT52856.2021.9532513.
- [35] Y. Men, "Intelligent sports prediction analysis system based on improved Gaussian fuzzy algorithm," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 7, pp. 5351–5359, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.08.084.
- [36] A. Pérez, "Análisis de Movimiento Humano: Aplicaciones en Rehabilitación Física," Univ. Nac. Autónoma de México, Mar. 10, 2015. [Online]. Available: <https://www.fis.unam.mx/seminarios/246/analisis-de-movimiento-humano-aplicaciones-en-rehabilitacion-fisica>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
- [37] L. Jiménez Ruiz y L. Siza Pillajo, "La práctica deportiva y su influencia en los problemas posturales mediante estudio bidimensional estático en los deportistas," Trabajo de Investigación de Magíster, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2018.
- [38] V. Tamayo, "Alteraciones posturales en bicrossistas de alto rendimiento del municipio de Envigado (segunda fase)," Univ. CES - UAM, 2011. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10946/2396>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [39] M. T. Pomés, "Postura y deporte. La importancia de detectar lesiones y encontrar su verdadera causa," *Inst. de Posturología y Podoposturología*, vol. 1, no. 3, pp. 1–3, 2008. [Online]. Available: http://www.ub.edu/revistaipp/hemeroteca/2_2008/t_pomes.pdf. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [40] J. Reig Doménech, "Estudio del estado del arte de los métodos de estimación de la pose humana en 3D," 2018. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/159143016.pdf>. [Accessed: Jul. 29, 2022].

- [41] J. Aguilera, J. Heredia, G. Peña y V. Segarra, "La evaluación postural estática (EPE): propuesta de valoración," *Inst. Internacional de Ciencias del Ejercicio Físico y la Salud*, Mar. 2015. [Online]. Available: <https://g-se.com/la-evaluacion-postural-estatica-epe-propuesta-de-valoracion-bp-b57cfb26dadaba>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [42] D. Torres, C. Ruíz, and O. Duque, "Desarrollo de un sistema de visión artificial multiperfil para el análisis deportivo del voleibol," *RIINN. Ing. e Innovación*, pp. 110–121, 2021, doi: 10.21897/23460466.2639.
- [43] C. Zalluhoglu and N. Ikizler-Cinbis, "Collective sports: A multi-task dataset for collective activity recognition," *Image Vis. Comput.*, vol. 94, p. 103870, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.imavis.2020.103870.
- [44] A. Nibali, J. Millward, Z. He, and S. Morgan, "ASPset: An outdoor sports pose video dataset with 3D keypoint annotations," *Image Vis. Comput.*, vol. 111, p. 104196, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.imavis.2021.104196.
- [45] Y. Desmarais, D. Mottet, P. Slangen, and P. Montesinos, "A review of 3D human pose estimation algorithms for markerless motion capture," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 212, p. 103275, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cviu.2021.103275.
- [46] Univ. Internacional de Valencia, "Biomecánica deportiva: métodos y funciones," España, 2022. [Online]. Available: <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/biomecanica-deportiva-metodos-y-funciones>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
- [47] L. Song, G. Yu, J. Yuan, and Z. Liu, "Human pose estimation and its application to action recognition: A survey," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 76, p. 103055, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jvcir.2021.103055.
- [48] Y. Liu and G. Zhao, "Simulation of swimming sports image recognition based on multi-core processor and dynamic image sampling," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 81, p. 103753, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103753.
- [49] J. Castellanos-Ruíz, L. M. Montealegre-Mesa, B. D. Martínez-Toro, J. J. Gallo-Serna, and O. Almanza-Fuentes, "Uso de sensores inerciales en fisioterapia: una aproximación a procesos de evaluación del movimiento humano," *Univ. Salud*, vol. 23, no. 1, pp. 55–63, Dec. 2020, doi: 10.22267/rus.212301.214.
- [50] J. Fan, S. Bi, R. Xu, L. Wang, and L. Zhang, "Hybrid lightweight deep-learning model for sensor-fusion basketball shooting-posture recognition," *Measurement*, vol. 189, p. 110595, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110595.
- [51] Y. Li and K. Zhao, "Sports motional characteristics modeling by leveraging multi-modal image technique," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 119, pp. 37–42, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.future.2021.01.031.

- [52] X. Dai and S. Lu, "Research on segmentation of sports images based on GM-MLS method," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 81, p. 103792, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103792.
- [53] C. Lu and F. Zhai, "Weakly-supervised large-scale image modeling for sport scenes and its applications," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 71, p. 102718, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jvcir.2019.102718.
- [54] R. C. M. Pereira, P. S. Vigário, M. R. M. Mainenti, D. T. R. Silva, T. R. L. Lima, and T. Lemos, "Computerized photogrammetric assessment of postural alignment in visually impaired athletes," *J. Bodyw. Mov. Ther.*, vol. 23, no. 1, pp. 142–147, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jbmt.2018.06.010.
- [55] C. Zhi-chao and L. Zhang, "Key pose recognition toward sports scene using deeply-learned model," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 63, p. 102571, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jvcir.2019.06.013.
- [56] M. Hu and Q. Hu, "Design of basketball game image acquisition and processing system based on machine vision and image processor," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 82, p. 103904, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2021.103904.
- [57] J. Fernández and J. Lazo, "Alteraciones posturales mediante fotogrametría computarizada en practicantes de artes marciales," Univ. Alas Peruanas, Perú, 2016. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12990/8291>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
- [58] M. Moness, S. K. Loutfy, and M. A. Massoud, "Selecting promising junior swimmers in Egypt using automated biometric algorithms of image processing and fuzzy concepts," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89476–89496, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3088409.
- [59] H. Lyu, Y. Fan, A. Hua, X. Cao, Y. Gao, and J. Wang, "Effects of unilateral and bilateral lower extremity fatiguing exercises on postural control during quiet stance and self-initiated perturbation," *Hum. Mov. Sci.*, vol. 81, p. 102911, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.humov.2021.102911.
- [60] E. Zhou and H. Zhang, "Human action recognition toward massive-scale sport sceneries based on deep multi-model feature fusion," *Signal Process. Image Commun.*, vol. 84, p. 115802, May 2020, doi: 10.1016/j.image.2020.115802.
- [61] J. Martínez and A. Urdampilleta, "Protocolo de medición antropométrica en el deportista y ecuaciones de estimaciones de la masa corporal," *Rev. Digit. EFDeportes*, no. 174, 2012. [Online]. Available: <https://www.efdeportes.com/efd174/protocolo-de-medicion-antropometrica-en-el-deportista.htm>. [Accessed: Nov. 16, 2022].

- [62] J. Vélez, "Análisis biomecánico de flexión y extensión del antebrazo," *Efisioterapia*, 2006. [Online]. Available: <https://www.efisioterapia.net/articulos/analisis-biomecanico-flexion-y-extension-del-antebrazo>. [Accessed: Jul. 29, 2022].
- [63] M. Macía, "La disciplina médica de la biomecánica, protagonista de la mano de MAZ en el 57º Congreso SERMEF," *Mutua MAZ*, 2019.
- [64] V. Doria, "El empleo del análisis biomecánico en la práctica deportiva; su estrecha y lógica relación con la técnica deportiva," *EFDeportes*, vol. 9, p. 66, 2003.
- [65] S. Subedi and N. Pradhananga, "Sensor-based computational approach to preventing back injuries in construction workers," *Autom. Constr.*, vol. 131, p. 103920, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103920.
- [66] M. F. Antwi-Afari et al., "Deep learning-based networks for automated recognition and classification of awkward working postures in construction using wearable insole sensor data," *Autom. Constr.*, vol. 136, p. 104181, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104181.
- [67] A. P. G. Castro et al., "Evaluation of spinal posture using Microsoft Kinect™: A preliminary case-study with 98 volunteers," *Porto Biomed. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 18–22, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.pbj.2016.11.004.
- [68] X. Wang and C. Jiang, "Computer-aided physical training sports injury risk simulation based on embedded image system," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 83, p. 103975, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2021.103975.
- [69] Y. Zhang, G. Liu, and S. Q. Xie, "Biomechanical simulation of anterior cruciate ligament strain for sports injury prevention," *Comput. Biol. Med.*, vol. 41, no. 3, pp. 159–163, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.combiomed.2011.01.006.
- [70] Y. Ren, C. Wang, L. Zhang, and A. Lu, "The effects of visual cognitive tasks on landing stability and lower extremity injury risk in high-level soccer players," *Gait Posture*, vol. 92, pp. 230–235, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.11.031.
- [71] J. M. Clark et al., "Proposed injury thresholds for concussion in equestrian sports," *J. Sci. Med. Sport*, vol. 23, no. 3, pp. 222–236, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jsams.2019.10.006.
- [72] J. Álvarez and V. Murillo, "Evolución de la prevención de lesiones en el control del entrenamiento," *Arch. Med. Deport.*, vol. 33, no. 171, pp. 37–58, 2016. [Online]. Available: https://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/rev1_Alvarez.pdf. [Accessed: Nov. 16, 2022].
- [73] L. Engebretsen and R. Bahr, "Why is injury prevention in sports important?," in *Sports Injury Prevention*, Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2009, pp. 1–6, doi: 10.1002/9781444303612.ch1.

- [74] Z. Ai, "Quantitative CT study of martial arts sports injuries based on image quality," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 60, pp. 417–425, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jvcir.2019.03.013.
- [75] C. Huang and L. Jiang, "Data monitoring and sports injury prediction model based on embedded system and machine learning algorithm," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 81, p. 103654, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103654.
- [76] V. Sarlis, V. Chatziilias, C. Tjortjjs, and D. Mandalidis, "A data science approach analysing the impact of injuries on basketball player and team performance," *Inf. Syst.*, vol. 99, p. 101750, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.is.2021.101750.
- [77] J. Yang, H. Xia, Y. Wang, and H. Tian, "Simulation of badminton sports injury prediction based on the internet of things and wireless sensors," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 81, p. 103676, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103676.
- [78] R. Pfeiffer and B. Mangus, *Las lesiones deportivas*, 4th ed., España, 2005.
- [79] R. Adedoyin and E. Johnson, "Physical management of pain in sport injuries," in *An International Perspective on Topics in Sports Medicine and Sports Injury*, InTech, 2012, doi: 10.5772/25454.
- [80] J. Hurtado, J. Santos, and I. Torres, "Factores de riesgo intrínsecos funcionales de lesiones deportivas en dos selecciones universitarias de voleibol de la ciudad de Cali," Univ. del Valle, Cali, 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10893/10281>.
- [81] Y. Zhou, X. Wu, and X. Li, "Prediction model of sports injury based on dynamic sampling and transfer learning," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 80, p. 103583, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103583.
- [82] R. Balamurugan, N. N. Prasanth, M. A. Prabakar, and K. V. Devi, "Sports activity recognition using classification techniques," *Mater. Today Proc.*, pp. 2214–7853, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.489.





Capítulo 08

Medición de la calidad del aire con apoyo en la inteligencia computacional

Air Quality Measurement Supported by Computational Intelligence

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.08>

Mariana Ardila-Liscano¹

Marcela Vallejo²

Edilson Delgado-Trejos³

¹ Investigadora, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-0033-9955, correo electrónico: marianaardila302062@correo.itm.edu.co

² Docente investigadora, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-9724-3169, correo electrónico marcelavallejo@itm.edu.co

³ Profesor titular, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-4840-478X, correo electrónico edilsondelgado@itm.edu.co

Resumen. Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire permiten recolectar datos sobre la presencia de contaminantes dañinos para la salud. Esta información ayuda a pronosticar concentraciones elevadas y a facilitar a las autoridades ambientales la generación de alertas y puesta en marcha de estrategias de mitigación. Las máquinas de aprendizaje han sido ampliamente usadas por su capacidad de modelar con datos. Sin embargo, la complejidad de la interacción entre variables meteorológicas y fuentes de emisión hace del modelado un problema de investigación abierto. El presente trabajo contiene una revisión de la literatura sobre las tendencias de investigación acerca del uso de las máquinas de aprendizaje para la predicción de la calidad del aire, adelantada mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos reconocidas. El resultado es un mapeo del uso de las rutinas computacionales de regresión y pronóstico en los sistemas de gestión ambiental, con énfasis en las potencialidades, limitaciones, retos y oportunidades de investigación; se destacan las capacidades que ofrecen las tecnologías de la cuarta revolución industrial y el auge de los sistemas IoT. Así, las máquinas de aprendizaje y la soft metrología fortalecen procesos de medición con impacto en la salud y el bienestar de las comunidades.

Palabras clave: calidad del aire, máquinas de aprendizaje, monitoreo de contaminación, pronóstico de calidad del aire.

Introducción



La calidad del aire es un elemento determinante en la salud pública y los efectos adversos de diferentes contaminantes, tales como el material particulado, el monóxido de carbono (CO) y el óxido de nitrógeno (NO_x), entre otros, han sido ampliamente estudiados [1]. Sin embargo, controlar la exposición de los ciudadanos a estos elementos requiere de la intervención de las autoridades, puesto que no depende de los individuos, sino de una interacción compleja entre las diferentes fuentes de emisión de contaminantes, variables climáticas y políticas públicas [2]. Esta problemática ha llevado a la creación de programas y sistemas para la gestión de la calidad del aire, que buscan proveer una información actualizada y confiable de la situación ambiental en un lugar dado, además de trazar estrategias para reducir

la contaminación y minimizar la exposición de las personas a sustancias dañinas.

Si bien existe una diversidad grande en los programas y sistemas creados en países, regiones y ciudades, los componentes fundamentales para gestionar la contaminación del aire son los estándares de calidad del aire, los sistemas y redes de monitoreo, la identificación de fuentes, el inventario de emisiones, el modelado de la calidad del aire, la predicción, herramientas de pronóstico, las estrategias de control y la participación del público [3]. Dentro de este esquema, el modelado de la calidad del aire y los sistemas de predicción y pronóstico son claves para ayudar a las autoridades ambientales a entender la dinámica de la calidad del aire y generar medidas preventivas [4].

Actualmente, el desarrollo acelerado de los sistemas computacionales y el auge de la cuarta revolución industrial han permitido la creación de herramientas de modelado y predicción basadas en aprendizaje de máquina, que ya se han empezado a adoptar en la problemática de la calidad del aire y que logran tener mejores resultados que otros modelos clásicos [5]. Sin embargo, la adopción de las rutinas computacionales es una tarea con muchos inconvenientes debido a la complejidad de los sistemas analizados, la dinámica de los datos y la dificultad para el aseguramiento de la validez de los resultados obtenidos [6].

El presente trabajo recopila el estado del arte en cuanto al uso de aprendizaje de máquina en la predicción de la calidad del aire, con el objetivo de identificar potencialidades y limitaciones de este enfoque, así como los retos y oportunidades en investigación. El resto del capítulo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se abordan los métodos que se utilizaron para la búsqueda de la información, incluyendo las bases de datos. En la sección 3 se exponen los resultados hallados en la literatura de las

técnicas más utilizadas para la predicción de la calidad del aire, abarcando el tratamiento y procesamiento de los datos con base en las variables de entrada y salida. En la sección 4 se incluyen las conclusiones en las que se sintetizan los retos y oportunidades encontrados en la búsqueda realizada.

8.2 Métodos

La recopilación de la información se efectuó mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos reconocidas como Springer Link, IEEEExplore, Scopus y Science Direct, de las que se analizó toda la información referente a los estudios, experimentos y avances científicos. En síntesis, se buscaron y exploraron tendencias de investigación de modelos computacionales para el monitoreo y predicción de la calidad del aire, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 8.1. Para esta búsqueda se utilizaron los términos clave en inglés: *air quality* y *machine learning*, *air quality prediction* y *machine learning*, y *air quality forecasting* y *machine learning*.

Tabla 8.1. Resultados en bases de datos reconocidas

Términos	Springer Link	IEEE	Scopus	Science Direct	Fecha de revisión
Air quality and machine learning	80.383	494	1.921	40.313	18/04/2022
Air quality prediction and machine learning	32.367	180	832	21.453	18/04/2022
Air quality forecasting and machine learning	5.093	100	711	11.551	18/04/2022

Fuente: elaboración propia.

La búsqueda en la base de datos se realizó en abril de 2022 y durante ese periodo se revisó la documentación con enfoque en el monitoreo de la calidad del aire, utilizando aprendizaje automático. El criterio y la justificación de la información seleccionada en este estudio se sustentaron en la revisión y análisis que se hicieron las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo las máquinas de aprendizaje pueden proporcionar precisión en la predicción de la calidad del aire?
- ¿Cuáles son los modelos de aprendizaje automático que ofrecen mejor precisión para la predicción de la calidad del aire?
- ¿En qué medida los sistemas computacionales favorecen los procesos de pronóstico de la calidad del aire para la toma de decisiones?

Así como se muestra en la figura 8.1, con estas preguntas se identificaron tendencias y enfoques en cuanto a la relación de concepto y procedimiento del análisis de la predicción del monitoreo de la calidad del aire, utilizando aprendizaje automático. Se examinaron las fuentes consideradas más relevantes en la búsqueda inicial de la literatura. La selección final quedó compuesta de 51 artículos que cubrieron el periodo mayoritariamente entre 2019 y 2022, aunque se incluyeron unos pocos artículos relevantes desde 2004.

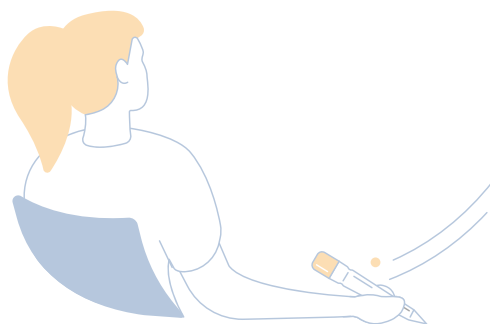
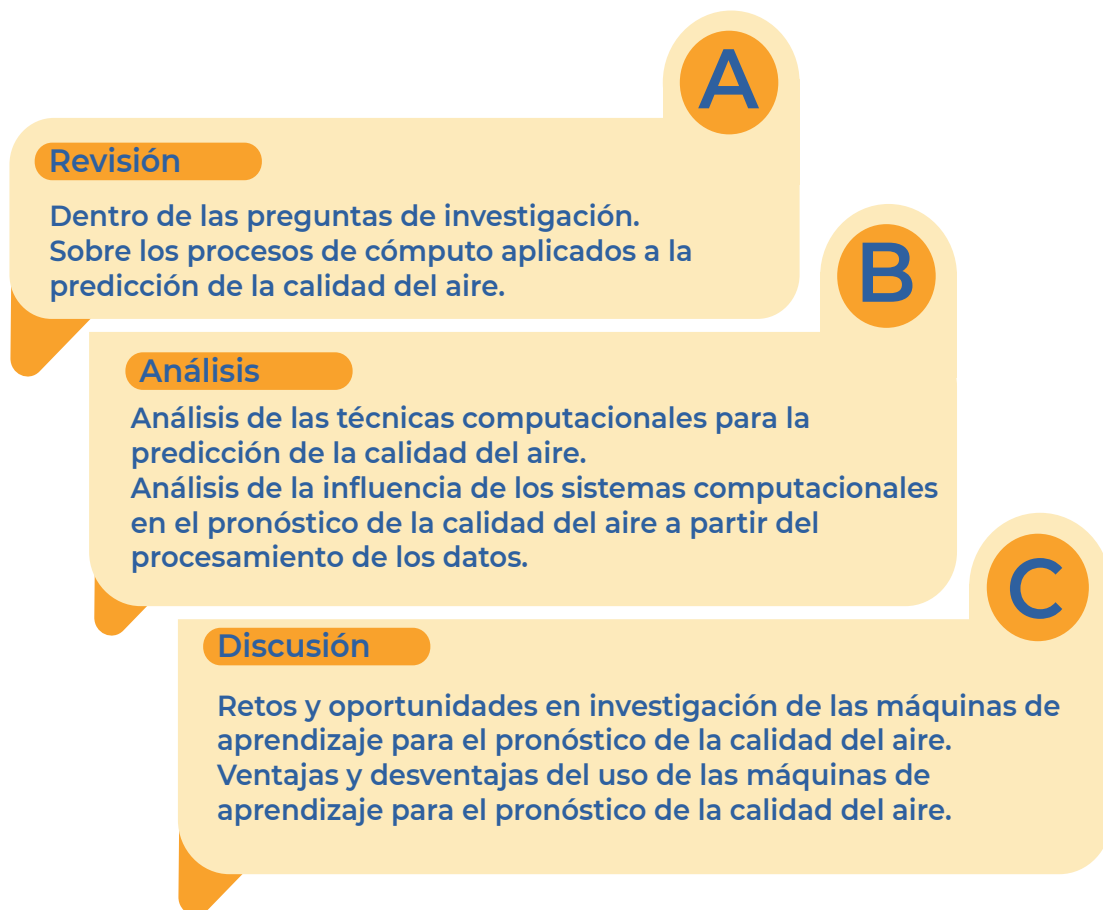


Figura 8.1. Esquema procedimental del análisis documental



Fuente: elaboración propia.

Dado que en la revisión se encuentra una gran variedad de métodos de inteligencia computacional, cada uno de los cuales suele nombrarse con una sigla, en la tabla 8.2 se presentan los métodos y siglas mencionados en las secciones subsiguientes. Los nombres de los métodos se escriben en inglés debido a que en muchos casos no tienen una traducción directa y se encuentran más fácilmente en ese idioma.

Tabla 8.2. Siglas usadas en este manuscrito

Sigla	Nombre	Sigla	Nombre
AdaBoost	Adaptive Boosting	MLEGRU	Multiple Linear Regression based GRU
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System	MLP	Multi Layer Perceptron - Perceptrón Multicapa
ANN	Artificial Neural Networks	MLR	Multiple Linear Regression - Regresión Lineal Múltiple
Arima	Autoregressive Integrated Moving Average - Modelo autorregresivo integrado de media móvil	MSSa	Multi-objective Salp Swarm algorithm
Bi-GRU	Bidirectional Gated Recurrent Unit -	MvMDE	Multivariate Multiscale Dispersion Entropy
Bi-LSTM	Bidirectional Long Short Term Memory	Narma	Nonlinear Autoregressive Moving -Average
BPCA	Bayesian Principal Component Analysis		
BPNN	Back Propagation Neural Network	NBC	Nave Bayes Classifier
BVMD	Variational Mode Decomposition Optimizado por Bald Eagle Search	OFR	Orthogonal Forward Regression
CatBoost	Categorical Features Gradient Boosting	PCA	Principal Component Analysis Perceptrón Multicapa
CEEMDAN	Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise	PMM	Predictive Mean Matching
CNN	Convolutional Neural Network	PR	Polynomial Regression
DMF	Deep Matriz Factorization		
DT	Decision Tree	Q-FUZZY	Quantized Fuzzification
DNN	Deep Neuronal Networks		
ELM	Extreme Learning Machine	RA	Rolling Average
EM	Expectation Maximization	RELM	Regularized Extreme Learning Machine
EMD-SVR-SARIMA	Empirical Mode Decomposition-Support Vector Regressions-Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average	RF	Random Forest

Continúa...

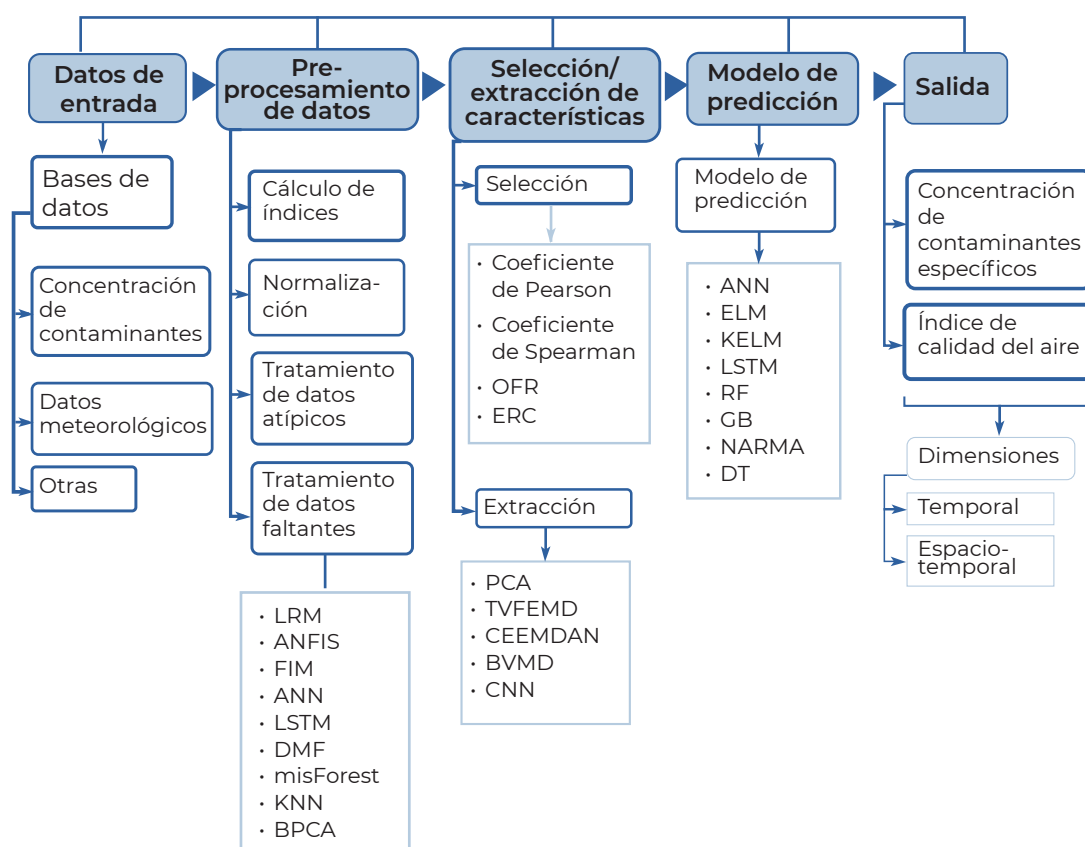
Sigla	Nombre	Sigla	Nombre
ERCFR	Ensemble of Regressor Chains-guided Feature Ranking	RR	Ridge Regression
RFELM	Random Fourier Extreme Learning Machine	RSO-KELM	Kernel Extreme Learning Machine optimizado por Rat Swarm Optimizer (RSO)
FIM	Fuzzy Imputation Model	SARIMA	Seasonal Arima
FLAR	Fuzzy Least Absolute Regression	SE	Sample Entropy
GAM	Generalized Additive Model.	SE	Stacking Ensemble
GB	Gradient Boosting	SG	Stacked Generalization
GBDT	Gradient-Boosted Decision Trees	SHAP	Shapley additive explanation
		SOM	Self- Organizing Maps
GBR	Gradient Boosting Regression-Resolución de Impulso de Gradiente	STAA-LSTM	Spatio-Temporal Attention LSTM
GLMNET	Generalized Linear Model with Elastic Net Penalties	SVM	Support Vector Machines
GRU	Gated Recurrent Unit	SVR	Support Vector Regression
ILSTM	Improved Long Short-Term Memory	SVS	Stepwise Variable Selection
KNN	K Nearest Neighbor	TOB	Transparent Open Box
LCIELM	Length-Changeable Incremental Extreme Learning Machine	TVFEMD	Time-varying Filter Empirical Mode Decomposition
LinR	Linear Regression	VMD	Variational Mode Decomposition
LR	Logistic Regression	WOA	Whale Algorithm Optimization
LSTM	Long Short-Term Memory	WOA-LSTM	Whale Algorithm Optimized Long Short-Term Memory
LUR	Land Use Regression	XGB	XGBoost
MARS	Multivariate Adaptive Regression <i>Splines</i>		
MF	Matrix Factorization		

Fuente: elaboración propia.

8.3 Resultados

A partir de la información analizada, a la luz de las preguntas de investigación planteadas, se puede identificar la estructura general para un sistema de predicción de calidad del aire, tal y como se muestra en la figura 8.2.

Figura 8.2. Esquema general de un sistema de predicción de calidad del aire



Fuente: elaboración propia.

El sistema se inicia con unos datos de entrada que suelen provenir de varias bases de datos, las cuales deben integrarse debidamente. Los datos considerados deben pasar por una etapa de procesamiento para facilitar su análisis y el correcto funcio-

namiento de las etapas siguientes, conformando un conjunto de características que serán la entrada del modelo de predicción. Un elemento importante en este punto es el tratamiento de datos faltantes, puesto que las bases de datos de calidad del aire suelen tener porcentajes relevantes de estos que no se han registrado adecuadamente. Una vez preprocesados los datos, algunos autores optan por una etapa de selección o extracción de características, con el fin de garantizar que las entradas al sistema sean efectivas para el proceso de predicción. Por último, la información va a un modelo de predicción en el que se hace propiamente el cálculo de las variables deseadas.

En las siguientes subsecciones se abordan las partes constitutivas, empezando por consideraciones sobre las entradas y salidas del sistema, continuando con el preprocesamiento de datos, luego la etapa de extracción o selección de características y terminando con los métodos usados para el modelo de predicción.

8.3.1 Variables que predecir

No todos los sistemas que buscan pronosticar la calidad del aire analizan las mismas variables. En cuanto a la salida que tiene el sistema, algunos métodos buscan la predicción de la concentración de un contaminante específico, como material particulado $PM_{2.5}$ [7], [8], [9], [10], [11], ozono (O_3) [12], [13] o benceno (C_6H_6) [14]. Otros predicen un conjunto de contaminantes cuya combinación varía según el autor específico. Entre los más comunes se encuentran monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), metano (CH_4), ozono (O_3), plomo (Pb), amoníaco (NH_3), y material particulado ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ o PM_{10}) [15], [16], [17]. En estos casos se suele generar

un modelo de predicción para cada contaminante y propuestas para el uso de una regresión multiobjetivo [18].

Los demás trabajos se concentran en predecir el índice de calidad del aire (ICA), que es una unidad adimensional que se calcula a partir de las concentraciones de uno o varios contaminantes individuales y resume el estado de la calidad del aire en un único valor [19], [20], [21], [22], [23], [24]. El modelo para calcular el índice de la calidad del aire varía de país en país, siendo diversos la cantidad y tipo de contaminantes considerados, así como el tiempo en el que se promedian y las funciones de agregación usadas para combinar los diferentes parámetros en un único valor [3]; en general, el modelo específico utilizado suele reflejar el enfoque en cuanto a la calidad del aire del país.

Otro punto relevante en cuanto a la salida es la dimensión de los datos. La mayoría de los trabajos de la literatura hacen simplemente una predicción temporal de la variable de interés. Sin embargo, algunos reportan la importancia de las variaciones espaciotemporales [10], [25], ante lo cual unos métodos introducen una dimensión espacial, buscando mayor precisión en cuanto a los resultados obtenidos. Tal es el caso de [19], quienes combinan un predictor temporal con una precisión del 79.5 % y un predictor espacial con precisión del 74.3 % para obtener un modelo con una precisión total del 80.6 %.

Asimismo, los autores de [14] propusieron un modelo para estimar variaciones espaciotemporales en el que se establece una relación entre las concentraciones de benceno y el tipo de uso dado al suelo (agricultura, vivienda, estaciones de gasolina, etc.); utilizan para la predicción una combinación entre un modelo Land-Use Regression (LUR) y 6 métodos de aprendizaje de máquina [14]. Otros utilizaron un modelo codificador-decodificador, en el que la idea es que el codificador modele las relaciones espacia-

les de los datos, seguido de una red STAA-LSTM para capturar las dependencias temporales de estos y terminar con un decodificador que arroja la predicción esperada [25].

Es necesario especificar que la presente revisión se concentra en predicción de concentraciones de contaminantes en el exterior, pero también existen trabajos que buscan la predicción en interiores [26]. En la tabla 8.3 se resumen las variables de predicción reportadas en la literatura.

8.3.2 Entradas del sistema

En cuanto a las entradas del sistema, todos los métodos utilizan datos históricos de concentración de contaminantes con sus respectivos marcadores temporales. Al igual que pasa con las entradas, los contaminantes específicos dependen del trabajo, pero los más comunes son los mismos reportados entre las salidas, además de hidrocarburos -no metano- (NMHC) e hidrocarburos totales (THC).

Tabla 8.3. Variables que predecir en diferentes trabajos de la literatura

Referencia	ICA	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	CO	SO ₂	NO	NO ₂	NO _x	C ₆ H ₆	PB	NH ₃
[19]	X												
[27]	X												
[28]	X												
[23]	X												
[29]	X												
[24]	X												
[30]	X												

Continúa...

Referencia	ICA	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	CO	SO ₂	NO	NO ₂	NO _x	C ₆ H ₆	PB	NH ₃
[21]	X												
[22]	X												
[20]	X												
[4]	X												
[7]			X										
[8]			X										
[9]			X										
[11]			X										
[31]			X										
[32]			X										
[33]			X										
[34]			X										
[10]			X										
[13]					X								
[14]											X		
[16]			X	X	X	X	X		X				
[17]			X	X	X	X	X		X				
[35]			X	X	X		X	X	X				
[25]			X	X	X	X	X		X			X	X
[36]			X	X									
[15]			X		X	X	X		X				
[18]					X		X	X	X	X			

Fuente: elaboración propia.

Algunos autores usan los datos mencionados como única entrada [24], [22], mientras que la mayoría adiciona datos meteo-

rológicos [20], [7], [8], [23]. Entre los parámetros más comunes en este sentido están la temperatura, humedad, presión, velocidad del viento y dirección del viento, pero algunos adicionan variables como precipitación [8], [9], [21], radiación solar [9], [23], [18] y visibilidad [28]. Además, en los países donde hay estaciones (primavera, verano, otoño, invierno), muchos autores incluyen una variable para representar la estación, al considerar que influye considerablemente en las predicciones [15], [21], [16], [18].

Otros trabajos incluyen variables adicionales que influyen en la concentración de contaminantes como el caso de [19], quienes incluyeron datos de pronóstico del tiempo. Algunos autores se concentran en los efectos de la cantidad de población [10], tráfico [13] y uso del suelo [10], [14] en las regiones de estudio. Otro enfoque es el de considerar el efecto de la cantidad de emisiones producidas específicamente por instalaciones industriales, como el caso de [4], que tuvieron en cuenta datos de emisión de gases residuales industriales [28], [11] que incluyeron información de flujo de emisiones de materiales de chimeneas [11]. En la tabla 8.4 se reporta el resumen de las variables de entrada consideradas en los diferentes trabajos de la literatura, especificando los datos de concentración de contaminantes, las variables meteorológicas y otras como datos de población, estación del año y datos de tráfico.

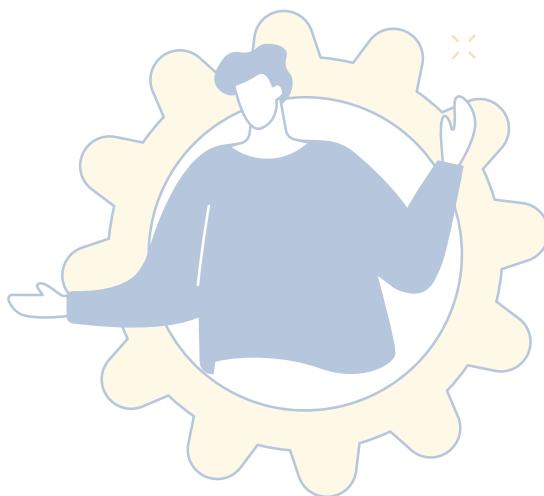


Tabla 8.4. Variables de entrada para el sistema de predicción

Referencia	Concentración de contaminantes														Variables meteorológicas								Otras variables											
	ICA	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	CO	CO ₂	SO ₂	NO	NO ₂	NO _x	C ₆ H ₆	CH ₄	NMHC	THC	T	H	P	Vv	Dv	Vi	Rs	Pc	Est	Po	Us	Tr	Gi	Ech	Prrm	Dg			
[27]	X																																	
[29]	X																																	
[34]			X																															
[30]			X	X	X	X		X		X																								
[17]			X	X	X	X		X		X																								
[37]			X	X	X	X		X		X																								
[22]			X	X	X	X		X		X																								
[24]			X	X	X	X		X		X																								
[8]			X													X	X	X	X	X				X										
[36]			X	X	X					X						X	X		X															
[20]			X	X	X	X		X		X						X	X	X																
[7]			X	X	X	X		X		X						X	X	X	X	X														
[31]			X		X	X		X		X						X	X																	
[35]			X	X	X			X	X	X						X	X																	
[33]			X	X	X	X		X		X						X	X	X	X					X										

Continúa...

	Concentración de contaminantes						Variables meteorológicas						Otras variables	
[23]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
[9]	X						X	X	X	X	X	X	X	
[16]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
[15]	X	X	X	X	X		X	X	X				X	
[11]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
[21]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[18]			X		X	X	X	X	X	X	X	X		
[13]			X				X	X	X	X	X	X	X	
[14]	X	X	X		X	X	X	X				X		
[28]	X						X	X	X	X	X		X	
[32]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
[19]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
[10]	X						X	X	X				X	

T: temperatura, H: humedad, P: presión, Vv: velocidad del viento, Dv: dirección del viento, Vi: visibilidad, Rs: radiación solar, Pc: precipitación, Est: estación del año, Po: población, Us: uso del suelo, Tr: datos de tránsito, Gi: gases industriales, Ech: emisiones de chimeneas industriales, Pm: datos de predicción meteorológica, Dg: datos geográficos y de altitud.

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de predicción es otro parámetro que se debe tener en cuenta al considerar la salida de un determinado método para predicción de la calidad del aire. El desempeño de este tipo de sistemas está fuertemente influenciado por la cantidad de tiempo hacia adelante para la que se requiere pronosticar la variable estudiada [21]. En ese sentido, algunos trabajos se concentran en pronósticos de corto plazo como una hora [26], [28], o exploran los resultados a varios horizontes de pocas horas (e.g., una hora, tres horas y seis horas) [19], [9], [21], [22].

Otros autores se enfocan en predicciones diarias [16], [10], [17], [37], [23], [28] y, en la mayoría de los casos, se hacen pronósticos de promedios diarios de las concentraciones, mientras que en otros se realizan predicciones a veinticuatro horas, pero detalladas por hora [18]. Algunos más buscan encontrar patrones que logren determinar las concentraciones con anticipación de semanas, quienes buscan predicciones a quince días [30] y a 7 días [7].

Algo importante para considerar es que, para lograr estas combinaciones de variables de entrada y salida para los modelos de predicción, los autores deben integrar diferentes bases de datos procedentes de la misma región geográfica y de las mismas fechas. En este sentido, los métodos que utilizan variables de diferentes naturalezas y fuentes deben tener en cuenta un cuidadoso proceso de integración de las bases de datos, además de un preprocesamiento de los datos.

8.3.3 Preprocesamiento de los datos

La predicción de la calidad del aire requiere la recopilación de una gran cantidad de datos, tanto de concentración de contaminantes como de variables meteorológicas, los cuales pueden tener rangos diversos y requieren cubrir un área geográfica extensa.

Esto conlleva redes de sensores grandes en las que, fácilmente, pueden producirse fallos que lleven a que el registro histórico de información contenga datos faltantes o inválidos, ya sea debido al desperfecto en alguno de los sensores de la red, en la transmisión de la información o por desconexiones de energía. Esto repercute significativamente en la calidad de la información y en el uso de esta.

Ante estas dificultades existen varias estrategias de preprocesamiento que suelen aplicarse. La primera es la detección de datos atípicos que pueden corresponder a fallos de los sensores y que afectarían el entrenamiento de los métodos de predicción [15], [34]. También es importante la normalización de los datos, lo que facilita el análisis de la interacción entre variables de rangos diversos [7], [20], [22]. Otros autores optan por no utilizar las variables iniciales, sino fabricar otras, ya sea calculando el índice de calidad del aire a partir de los contaminantes específicos [20], [30], derivando características adicionales relacionadas con el tiempo o aplicando alguna transformación sobre los datos [15].

Uno de los problemas principales en el contexto estudiado en este capítulo es la imputación de datos faltantes, dado que las bases de datos con las que se trabaja tienen porcentajes muy importantes de datos que se han perdido o dañado, razón por la cual se hará énfasis en las técnicas utilizadas para solucionar este inconveniente en la siguiente subsección.

8.3.4 Imputación de datos faltantes

Ante la problemática de los datos faltantes, es común utilizar técnicas de interpolación para intentar recomponer la información perdida, usualmente haciendo una media entre los valores más cercanos o aplicando la ecuación de una línea recta entre los

puntos adyacentes al sector con los datos faltantes [38]. Sin embargo, estas técnicas no resultan eficientes cuando el porcentaje de datos faltantes es alto o cuando los conjuntos de valores son multivariados y complejos [39], lo cual ha derivado en la búsqueda de alternativas basadas en modelos para recuperar los datos faltantes con base en la dinámica general del sistema en lugar de considerar solo los puntos adyacentes, obteniendo mejores resultados [40].

Para la generación de dichos modelos, algunos autores han aplicado algoritmos de regresión múltiple con regularización para la imputación de datos faltantes [41], [42]. Y propusieron [41] el uso de algoritmos de regresión múltiple con regularización como *Ridge Regression* (RR) y Lasso en una base de datos de O_3 , CO , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas, en Cuenca (Ecuador). Los resultados fueron adecuados; y aunque al aumentar el tamaño del *gap* (brecha) de datos faltantes el desempeño bajaba un poco, este seguía siendo satisfactorio con R^2 mayores a 0.96. Entre los dos métodos usados, Lasso mostró el mejor desempeño, entregando, además, modelos más simples con menor cantidad de variables predictoras [41]. Por otro lado, compararon RR con otros métodos, en su mayoría basados en sistemas difusos [42]. En dicho trabajo, el método propuesto, que se componía de una combinación entre un modelo *quantized fuzzification* (Q-FUZZY) y uno de *fuzzy imputation model* (FIM), obtuvo los mejores resultados para la mayoría de las métricas elegidas [42].

Para mejorar el desempeño, se ha propuesto la mezcla de los métodos regularizados con otras técnicas, como el caso de [43] quienes combinaron una *Elastic Net*, un método de regresión regularizado, con un *adaptive neuro fuzzy inference system* (ANFIS). En general, los métodos que usan redes neuronales se han usado ampliamente, dada su capacidad de modelado de sistemas com-

plejos. Se compararon los resultados de aplicar técnicas convencionales, como interpolación por media y por línea recta, con modelos de *artificial neural networks* (ANN) y *self-organizing maps* (SOM), encontrando un mejor desempeño para los dos últimos cuando los *gaps* de datos faltantes eran grandes [39]. También encontraron buenos resultados con el uso de redes neuronales, comparando los métodos de *linear regression* (LR) y *support vector regression* (SVR) con ANN y *long short-term memory* (LSTM); y, además, hallaron que los métodos de aprendizaje profundo (ANN y LSTM) superaban a los demás en las pruebas realizadas que consideraron la recuperación de datos faltantes de $PM_{2.5}$ en Taiwán [40].

Otros métodos basados en redes neuronales han sido propuestos, como en [44], quienes plantearon el uso de técnicas de *matrix factorization* (MF) y *deep matrix factorization* (DMF) [45], buscando incluir relaciones espaciotemporales que mejoren la eficiencia de la imputación de datos cuando el porcentaje de faltantes es elevado. Otra alternativa es el uso de *random forest* (RF) o variaciones de esta técnica. En [46], por ejemplo, encontraron resultados satisfactorios al aplicar RF para los datos faltantes de PM_1 . En [47], por otro lado, compararon métodos para una base de datos multivariada que consideraba CO , PM_{10} , SO_2 y O_3 . Los resultados mostraron un mejor desempeño para el uso de *missForest*, una técnica de imputación de datos basada en RF, no paramétrica y que no requiere asumir la distribución de los datos, con respecto a RF y a otros métodos de referencia como *K nearest neighbors* (KNN) y *bayesian principal component analysis* (BPCA) [47].

También debe señalarse que, al igual que para la predicción de la calidad del aire, en el caso de datos faltantes, puede distinguirse entre los trabajos aquellos contaminantes considerados. Algunos autores se basan en la imputación de datos faltantes para un único contaminante, a partir solamente de la serie de datos de dicha variable [40], [45], [44], [41], mientras que otros utilizan

variables adicionales (meteorológicas o concentraciones de otros contaminantes) para lograr mejor desempeño en el tratamiento de datos faltantes de una sola variable [38], [46]. Por último, otros trabajos abordan la imputación de valores de varios contaminantes [39], [47], [42], [43]. En la tabla 8.5 se sintetizan los métodos para imputación de datos faltantes frecuentemente reportados en la literatura.

Tabla 8.5. Métodos usados para imputación de datos faltantes

Referencia	Métodos
[39]	Media, línea recta, ANN, SOM, NN
[38]	Media, media condicional, KNN, BPCA
[40]	LR, ANN, SVR, LSTM
[47]	RF, KNN, BPCA, EM with Bootstrapping, PMM, missForest
[41]	RR y Lasso
[45]	DMF
[42]	Q-FUZZY, FIM, FLAR, RR y EMD-SVR-SARIMA
[46]	RF
[43]	Elastic Net y ANFIS

Fuente: elaboración propia.

8.3.5 Selección y extracción de características

Cuando se consideran múltiples características de entrada a un sistema de aprendizaje, pueden existir problemas relacionados con la relevancia que cada una tiene para la predicción [16], en especial cuando la dimensionalidad del conjunto de datos es muy grande. En ese sentido, algunos autores proponen el uso de técnicas de selección de características en las que se busca eliminar las variables con poca relevancia, o de extracción de característi-

cas en las que se generan otras nuevas que representen mejor la dinámica del sistema que las originales.

Una alternativa popular para la selección de variables es el uso de métodos de filtro que utilizan coeficientes de correlación para determinar la dependencia entre variables. Por ejemplo, utilizaron el coeficiente de Spearman [14] y el coeficiente de correlación de Pearson [7]. También usaron el coeficiente de Pearson, pero en este caso primero aplicaron la transformación Yeo-Johnson a los datos; luego, eliminaron variables redundantes, determinando si había colinealidad y, al final, usaron *principal component analysis* (PCA) para determinar el conjunto final de características [15].

Otros autores optan por utilizar métodos basados en *forward* y *backward stepwise regression*, donde se van adicionando o eliminando características de forma gradual a un modelo, buscando el mejor desempeño. Por ejemplo, usaron el algoritmo *orthogonal forward regression* (OFR) con buenos resultados [9]. Por otro lado, usaron un algoritmo ensemble of regressor chains junto a random forest para modelar y determinar la importancia de las características en un sistema multiobjetivo [18].

En cuanto a la extracción de características, aplicaron *time-varying filter empirical mode decomposition* (TVF-EMD), una variación de *empirical mode decomposition* (EMD), la cual es una técnica multirresolución que permite descomponer una señal en diversas funciones de modo intrínseco [17]. Otra variación de EMD es la usada por quienes utilizan *complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise* (CEEMDAN), empleando luego *multivariate multiscale dispersion entropy* (MvMDE) para calcular la complejidad de cada componente y luego utilizar un algoritmo de *variational mode decomposition* optimizado por *bald eagle search* (BVMD) para descomponer aún más las componentes de mayor complejidad [37].

Un trabajo similar fue presentado con el uso de CEEMDAN y *sample entropy* para la extracción de características [27]. También se propone una extracción de características con una modificación de EMD, específicamente *complementary set empirical mode decomposition* (CEEMD) [29]. Otra propuesta para encontrar un conjunto de características que ofrezca una representación efectiva de la información es la de quienes utilizaron una *convolutional neural network* (CNN) como herramienta para la extracción de características que luego fueron procesadas por otro algoritmo de aprendizaje profundo [22]. La tabla 8.6 presenta los principales métodos utilizados para la selección o extracción de características en la literatura consultada.

Tabla 8.6. Métodos usados para selección/extracción de características

Referencia	Métodos
[15]	Yeo-Johnson Power Transformation, Coeficiente de correlación de Pearson y PCA
[7]	Coeficiente de correlación de Pearson
[9]	OFR
[16]	Feature importance
[10]	N/A
[13]	TVFEMD
[37]	CEEMDAN, mvMDE y VMD
[18]	ERCFR
[14]	Coeficiente de correlación de Spearman y SVS
[22]	CNN
[31]	CNN
[29]	EEMD, CEEMD y FE
[36]	SHAP
[34]	VMD
[27]	CEEMDAN y SE

Fuente: elaboración propia.

8.3.6 Modelos de predicción

Los trabajos encontrados en la literatura proponen diversas técnicas de aprendizaje de máquina para la predicción de la calidad del aire, cada una con ventajas y desventajas en cuanto a simplicidad, velocidad y desempeño. De hecho, la mayoría de los artículos encontrados compara los resultados con diferentes técnicas o contrastan los resultados de un método propuesto con uno o varios métodos de referencia.

Una de las opciones más populares es el uso de ANN [20], [8], [16], [23], [13] y Deep Learning [19], [7], [17], [37], [14], [22], debido a sus capacidades para modelar sistemas complejos.

Un método con buenos resultados es el uso de *extreme learning machines* (ELM), con diferentes variaciones. Unos autores propusieron el empleo de una técnica llamada *length-changeable incremental extreme learning machine* (LCIELM) para evitar el *overfitting* al determinar el número de neuronas ocultas de forma adaptativa cuando se predice el nivel de diferentes contaminantes en varias ciudades de China [17]. De forma similar, otros autores realizaron predicciones para el índice de calidad del aire mediante un modelo de Kernel ELM (KELM) optimizado mediante un algoritmo de *Rat Swarm Optimizer* (RSO) [37]; los resultados fueron comparados con el uso de *Support Vector Machines* (SVM), ELM y KELM, y se obtuvieron errores más pequeños para el método propuesto. Unos más, en [34], adoptaron *Random Fourier Extreme Learning Machine* (RFELM) para la predicción de $PM_{2.5}$.

Otra alternativa muy utilizada dentro del Deep Learning son las redes LSTM, una derivación de las *convolutional neural networks* (CNN), que ha obtenido resultados superiores a otros métodos [19], [26], [35], [33], dado que se especializan en el análisis de series temporales, precisamente para hacer estimaciones futuras

a partir de registros históricos. Algunos compararon el desempeño de LSTM con un modelo *autoregressive integrated moving average* (Arima) y uno *gradient-boosted decision tree* (GBDT) para la predicción del índice de calidad del aire; hallaron un desempeño superior para LSTM [19].

A pesar de los buenos resultados, otros autores han reportado un comportamiento inferior para LSTM en contraste con otros métodos, como el caso de los que obtuvieron uno de los menores desempeños con LSTM al compararlo con SVR, RF y perceptrón multicapa [23].

Por otro lado, algunos autores han propuesto modificaciones al LSTM para mejorar el desempeño, como quienes aplicaron un modelo *improved long short-term memory* (ILSTM) en combinación con una CNN para predecir concentraciones de $PM_{2.5}$ [22]. Otros autores han probado combinaciones similares que compararon diferentes modelos de aprendizaje profundo como *Gated Recurrent Unit* (GRU), LSTM, CNN y varias mezclas de estos, obteniendo el mejor resultado con la combinación entre LSTM y CNN [7].

Igualmente, se han probado variaciones y combinaciones con GRU, como en el trabajo en el que se comparan varios modelos basados en GRU, obteniendo el mejor resultado con MLEGRU, un método basado en *Multiple Linear Regression* (MLR) [32]. A pesar de sus buenos resultados, una de las principales desventajas de las redes neuronales es la interpretabilidad de los resultados, razón por la cual varios autores propusieron un modelo híbrido entre una *deep neural network* (DNN) y un modelo *nonlinear auto regressive moving average* (Narma), con el objetivo de usar las capacidades de las redes neuronales, pero obteniendo una mayor interpretabilidad en el modelo e integrando una selección automática de variables [9].

Los autores compararon el modelo propuesto con una red neuronal *Feedforward*, LSTM y GRU. Los resultados mostraron igual o mejor desempeño para el método híbrido con respecto a los otros, disminuyendo el tiempo de entrenamiento y mejorando la interpretabilidad.

Otro método popular para la predicción de la calidad del aire son los *Decision Trees* (DT) [48], [24], [49], un algoritmo no paramétrico que utiliza estructuras en forma de árbol. El trabajo de [24] comparó el desempeño de DT con varios métodos, como *Logistic Regression* (LR), SVM y KNN, encontrando los mejores resultados con DT. Sin embargo, otros trabajos encuentran niveles de precisión relativamente bajos con esta técnica [48], [28], aunque también se reporta que el tiempo de procesamiento es menor que para otras técnicas [8]. Los RF, que son básicamente combinaciones de varios DT, también han sido muy usados, reportando mayores precisiones [36], manteniendo un tiempo de procesamiento bajo [8] y evitando el *overfitting* [50]. En los trabajos que comparan varias técnicas de aprendizaje de máquina, los RF suelen estar entre los de mayor precisión [13], pero no siempre son los del mejor desempeño [23], [26].

Otros autores apuestan por la adopción de SVM [21] y SVR [15], reportando resultados satisfactorios con horizontes entre una y 24 horas. Sin embargo, debe señalarse que en los trabajos en los que se comparan varias técnicas, esta alternativa no suele obtener los mejores resultados [20], [10], [13], aunque para algunos autores tiene resultados destacados para porciones específicas de los datos [23].

Es importante aclarar que, aunque muchos autores se decantan por algoritmos individuales para la predicción, una alternativa importante es la creación de modelos híbridos que aprovechan las ventajas de múltiples métodos individuales para lograr una

mayor precisión de pronóstico, aumentando la complejidad del modelo. Esto suele mejorar la solidez del sistema, pero aumenta el costo computacional y reduce la eficiencia de tiempo de los modelos. Tal es el caso de [16], que comparan el resultado de métodos individuales como SVR, RF y el perceptrón multicapa con un *Ensemble Model* (EM), obteniendo un mejor desempeño para el modelo conjunto [16]. Ya se han mencionado también casos como el de [22] y [7], que consiguieron mejores resultados integrando CNN y LSTM, y el de [9], que combinaron una CNN con Narma [9].

Otra tendencia importante en este sentido son los métodos de aprendizaje Boosting, que se basan en la combinación de varios predictores sencillos en secuencia, cada uno con un diferente peso específico dentro del conjunto. Existen diferentes variaciones de *Boosting* que han sido utilizadas en el contexto de la predicción de la calidad del aire, como *Gradient Boosting* [8], [10], [26], [11], Adaboost [23], XGBoost (XGB) [13], [51] y CatBoost [14]. La tabla 8.7 muestra un compendio de los reportes hallados en la literatura, especificando métodos, horizonte de predicción y mejores resultados obtenidos.

8.4 Conclusiones

El pronóstico de la calidad del aire es uno de los elementos de un sistema de gestión de la calidad del aire, cuya importancia radica en que permite a las autoridades ambientales adelantar acciones de mitigación ante alertas de futuros pico de concentración de contaminantes para proteger la salud de los ciudadanos.

Tabla 8.7. Métodos usados para predicción

Referencia	Método de predicción	Horizonte de predicción	Resultados
[19]	QP-DNN (LSTM más DNN)	1h - 6h	MAE: 20.9
[20]	AdaBoost, ANN, RF, SE y SVM.	1 h, 8 h y 24 h	Mejores resultados con SE RMSE: 22.618 MAE: 16.105 R2:0.735
[15]	SVR	24h	Mejores resultados Ozono= MAE: 0.088 R2: 0.982 RMSE: 0.133 CO= MAE: 0.211 R2: 0.868 RMSE: 0.367 SO2= MAE: 0.414 R2: 0.273 RMSE: 0,703 NO2= MAE: 0.162 R2: 0.937 MAE:0,238 PM2.5= MAE: 0.331 R2: 0.647 RMSE: 0,512
[7]	LSTM, Bi-LSTM, GRU, Bi-GRU, CNN, y CNN-LSTM	1 día 7 días	Mejores resultados con CNN-LSTM 1 día= MAE: 6.742 RMSE: 12.921 R2: 0.989 7 días= MAE: 9.034 RMSE: 16.625 R2: 0.979
[8]	GBR, RF, ANN	Máximos y mínimos en la semana siguiente	Mejores resultados con MLP Chengdu=MAE: 9.8, RMSE: 0.108 Beijín= MAE 21.79 RMSE 0.0806
[9]	DNN con Norma	1h, 3h y 6h	1 hora= CC: 0.9855 NRMSE: 0.0229 3 horas= CC: 0.9253 NRMSE: 0.0511 6 horas= CC: 0.8294 NRMSE: 0.0752
[21]	SVM	1h - 12h	1 hora= R2: 0.98

Continúa...

Referencia	Método de predicción	Horizonte de predicción	Resultados
[16]	MLR, MLP, RF, GBDT, SVR-SG combinados en EM	Diario	PM2.5 = RMSE: 16.84 R: 0.83 PM10= RMSE: 25.78 R: 0.79 SO2= RMSE: 0.79 R: 0.71 NO2= RMSE: 9.76 R: 0.83 O3= RMSE:14.07 R: 0.89 CO= RMSE: .19 R: 0.8
[10]	RF, GB, SVM, MARS, GLMNET y GAM.	Diario	Mejores resultados con RF RMSE 12.92 R2: 0.96
[17]	LCIELM	Diario	PM 2.5= MAE: 0.2931 RMSE: 0.4371 PM10= MAE: 0.5729 RMSE: 0.7611 SO2= MAE: 0.0306 RMSE:0.0414 CO= MAE: 0.0028 RMSE: 0.0037 NO2= MAE: 0.1192 RMSE: 0.3054 O3= MAE: 1.2831 RMSE: 1.6746
[37]	RSO-KELM	Diario	RMSE: 2.9127 MAE: 2.2351
[23]	Adaboost, CNN, DT, ELM, GRU, KNN, LSTM, MLP, MLR, RF, SVR, TOB	Diario	Mejores resultados con Adaboost R2: 0.5655 RMSE: 0.0516 MAE: 0.0364
[18]	RF	24h	Sfax = RMSE: 250 R2: 0.78 Italia = RMSE: 2500 R2: 0.95
[13]	PR, MLP, XGB, SVM, RF, LinR y KNN	Anual por hora	Mejores resultados con XGB NRMSE: 5.07 R2: 0.785
[30]	MLR, Arima	15 días	MLR= MAE: 2.804 R2: 0.97 RMSE: 4.44 Arima= MAE2: 8.05 R2: 0.9 RMSE: 9.15

Continúa...

Referencia	Método de predicción	Horizonte de predicción	Resultados
[14]	LUR combinado con: RF, DNN, GB, Light GBM, CatBoost, XGB y EM	-	Mejor resultado con EM R2:0.89 MSE: 0.01 MAE: 0.04
[28]	RF	Diario	R2: 0.9
[22]	ILSTM	1h	MAE: 8.4134 MSE: 202.1923 R2: 0.9601
[31]	SGD, 1D CNN-LSTM, XGB y Prophet	1h - 24 h	Mejores resultados con SGD RMSE: 3.38 MAE: 2.64
[32]	Variaciones de GRU y Multiple Linear Regression based GRU	1h - 12h	Mejores resultados con MLEGRU 1h= MRSE: 2.62 6h= MRSE: 3.93 12h= MRSE. 4.6
[34]	RFELM con 2,1-norm y optimizado por MSSa	Diario	MAE: 1.6437 RMSE: 1.9536

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la predicción acertada de concentraciones de contaminantes implica retos importantes como la integración de las bases de datos necesarias para entrenar los predictores, la imputación de datos faltantes en dichas bases de datos y la generación de modelos confiables, considerando la alta complejidad de las interacciones entre las variables asociadas a la concentración de contaminantes, las variables meteorológicas, las características geográficas y otros factores de influencia.

Aunque las técnicas de aprendizaje de máquina han mostrado una importante capacidad para la predicción, los resultados encontrados en la literatura son diversos y difíciles de comparar, debido al amplio espectro de características encontradas, en cuanto a contaminantes considerados, predictores elegidos, locaciones geográficas, horizontes de predicción y métricas de calidad de los

resultados. La presente revisión se ha concentrado en identificar oportunidades de investigación dentro del desarrollo actual en un panorama tan diverso y heterogéneo.

Para empezar, se evidencia que el PM2.5 y el ICA son las variables más comunes para predecir en la literatura, por lo cual se prestan para comparación de métodos y resultados. También debe decirse que la gran mayoría de los trabajos se han realizado en China, con algunos otros localizados en India y Estados Unidos, y algunos pocos en otros países diversos. Esto convierte los trabajos de China en puntos importantes de referencia, pero es pertinente considerar que los análisis comparativos deben tener muy en cuenta las características geográficas y poblacionales de las regiones de las cuales se toman las bases de datos.

Debe decirse que la gran mayoría de los trabajos consultados integran varias bases de datos de forma simultánea, lo cual motiva un interés especial por el preprocesamiento y la elección de la información que se va a utilizar. Se ha demostrado que las variables meteorológicas influyen de manera directa en el comportamiento futuro de la calidad del aire, pero adicionalmente, las últimas investigaciones hacen énfasis en la necesidad de incluir una dimensión espacial para dar mayor sentido a las predicciones temporales.

Sin embargo, la inclusión de dimensiones adicionales hace aún más complejo el espacio de representación constituido por las características de entrada al sistema de predicción, lo cual se ha visto reflejado en el uso de técnicas de selección o extracción de características, entre las cuales se resaltan el amplio uso de los métodos de filtro y los excelentes resultados obtenidos con métodos de extracción como CNN y EMD. En este sentido, los métodos de filtro se presentan como una alternativa para hacer uno inicialmente, pero las técnicas de tiempo-frecuencia se presentan como una alterna-

tiva interesante para la exploración de esquemas de generación de espacios de representación en este contexto.

En cuanto a los métodos de predicción, las principales tendencias son el uso de Deep Learning, en especial mediante redes LSTM, y el uso del RF. Sin embargo, los sistemas híbridos, que aprovechan las ventajas de varios modelos para lograr un resultado global más eficiente, han tomado fuerza y se presentan como un esquema importante en este contexto, ante el cual es relevante explorar la forma de optimizar la combinación de rutinas computacionales para lograr una hibridación exitosa.

En cuanto a los resultados, la mayoría de los métodos se evalúan en términos de R², MAE o RSME, lo cual permite conocer el comportamiento de los sistemas en entrenamiento y validación. Sin embargo, hay una evidente carencia de análisis de los resultados en términos de la incertidumbre de las predicciones, lo cual brindaría importantes herramientas estadísticas para comprender la validez de los resultados. En este sentido, hay una oportunidad sustancial de explorar los métodos bayesianos para integrar el concepto de incertidumbre en las predicciones.

Con este artículo se recopilaron las principales técnicas que se han utilizado para predecir la calidad del aire, utilizando aprendizaje automático; todo esto se logra mediante una investigación exhaustiva en la que se hallaron los principales avances y tendencias en esta área, con el fin de generar conocimiento y facilitarles el trabajo a aquellas personas que investigan técnicas para predecir la calidad del aire o proporcionar información relevante de aquellos modelos que tienen alta precisión para que las autoridades ambientales puedan generar sistemas de alerta temprana y las personas puedan tomar decisiones respecto a sus actividades cotidianas.

Agradecimientos

Este trabajo se hizo dentro de las actividades requeridas en el programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores de la Institución Universitaria ITM de Medellín.

Declaración de conflicto de intereses

En aras de la transparencia, se declara por parte de los investigadores y participantes del proyecto, que no presenta ningún conflicto que involucrara los intereses en la realización del proyecto, durante o después de este, de índoles comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

Según la Resolución 008430 de 1993, del Ministerio de Salud, la presente investigación no presentó riesgos de ningún tipo (biológico, ambiental o ético) que pudiera afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno o la sociedad ni al medioambiente. Se informa que en ningún momento de la investigación se realizaron pruebas en humanos o animales y en ninguna etapa o actividad se contempló la interacción con pacientes ni la manipulación de información confidencial, puesto que los procedimientos fueron de tipo computacional sobre bases de datos especializadas y, por ende, no se estima necesario el aval de un comité de ética.

Referencias

- [1] R. S. Sokhi *et al.*, "Advances in air quality research – current and emerging challenges," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 22, no. 7, pp. 4615–4703, Apr. 2022, doi: 10.5194/acp-22-4615-2022.
- [2] World Health Organization, "WHO: Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project: Technical Report," 2013. [Online]. Available: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf
- [3] K. Priti and P. Kumar, "A critical evaluation of air quality index models (1960–2021)," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, no. 4, 2022, doi: 10.1007/s10661-022-09896-8.
- [4] Y. Li *et al.*, "Air quality forecasting with artificial intelligence techniques: A scientometric and content analysis," *Environ. Model. Softw.*, vol. 149, p. 105329, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.envsoft.2022.105329.
- [5] V. M. Ribeiro, "Sulfur dioxide emissions in Portugal: Prediction, estimation and air quality regulation using machine learning," *J. Clean. Prod.*, vol. 317, p. 128358, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128358.
- [6] S. Bhattacharya and S. Shahnawaz, "Using Machine Learning to Predict Air Quality Index in New Delhi," Dec. 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2112.05753>
- [7] A. Bekkar *et al.*, "Air-pollution prediction in smart city, deep learning approach," *J. Big Data*, vol. 8, no. 1, p. 161, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40537-021-00548-1.
- [8] S. Ameer *et al.*, "Comparative Analysis of Machine Learning Techniques for Predicting Air Quality in Smart Cities," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128325–128338, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925082.
- [9] Y. Gu, B. Li, and Q. Meng, "Hybrid interpretable predictive machine learning model for air pollution prediction," *Neurocomputing*, vol. 468, pp. 123–136, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.neucom.2021.09.051.

- [10] T. Enebish *et al.*, "Predicting ambient PM_{2.5} concentrations in Ulaanbaatar, Mongolia with machine learning approaches," *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 31, no. 4, pp. 699–708, Jul. 2021, doi: 10.1038/s41370-020-0257-8.
- [11] M. Lee *et al.*, "Forecasting Air Quality in Taiwan by Using Machine Learning," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 4153, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-61151-7.
- [12] A. S. Srinivas *et al.*, "Predicting Ozone Layer Concentration Using Machine Learning Techniques," in *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 2019, pp. 83–92, doi: 10.1007/978-981-13-1456-8_7.
- [13] J. Du *et al.*, "Forecasting ground-level ozone concentration levels using machine learning," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 184, p. 106380, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106380.
- [14] C. Y. Hsu *et al.*, "A mixed spatial prediction model in estimating spatiotemporal variations in benzene concentrations in Taiwan," *Chemosphere*, vol. 301, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134758.
- [15] M. Castelli *et al.*, "A Machine Learning Approach to Predict Air Quality in California," *Complexity*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8049504.
- [16] H. Ke *et al.*, "Development and application of an automated air quality forecasting system based on machine learning," *Sci. Total Environ.*, vol. 806, p. 151204, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151204.
- [17] Z. Du *et al.*, "An innovative ensemble learning air pollution early-warning system for China based on incremental extreme learning machine," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 12, no. 9, p. 101153, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apr.2021.101153.
- [18] S. Masmoudi *et al.*, "A machine-learning framework for predicting multiple air pollutants' concentrations via multi-target regression and feature selection," *Sci. Total Environ.*, vol. 715, p. 136991, May 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136991.
- [19] Z. Zou, T. Cai, and K. Cao, "An urban big data-based air quality index prediction: A case study of routes planning for outdoor activities in Beijing," *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 948–963, Jul. 2020, doi: 10.1177/2399808319862292.
- [20] Y.-C. Liang *et al.*, "Machine Learning-Based Prediction of Air Quality," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 24, p. 9151, Dec. 2020, doi: 10.3390/app10249151.
- [21] C. C. Liu *et al.*, "Spatio-temporal prediction and factor identification of urban air quality using support vector machine," *Urban Clim.*, vol. 41, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2021.101055.
- [22] J. Wang *et al.*, "An air quality index prediction model based on CNN-ILSTM," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-12355-6.

- [23] D. A. Wood, "Local integrated air quality predictions from meteorology (2015 to 2020) with machine and deep learning assisted by data mining," *Sustain. Anal. Model.*, vol. 2, p. 100002, 2022, doi: 10.1016/j.samod.2021.100002.
- [24] S. Yarragunta *et al.*, "Prediction of air pollutants using supervised machine learning," in *Proc. 5th Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst. (ICICCS)*, May 2021, pp. 1633–1640, doi: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432078.
- [25] S. Abirami and P. Chitra, "Regional air quality forecasting using spatiotemporal deep learning," *J. Clean. Prod.*, vol. 283, p. 125341, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125341.
- [26] A. Mohammadshirazi *et al.*, "Predicting airborne pollutant concentrations and events in a commercial building using low-cost pollutant sensors and machine learning: A case study," *Build. Environ.*, vol. 213, p. 108833, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108833.
- [27] C. Ji *et al.*, "A multi-scale evolutionary deep learning model based on CEEM-DAN, improved whale optimization algorithm, regularized extreme learning machine and LSTM for AQI prediction," *Environ. Res.*, vol. 215, p. 114228, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.114228.
- [28] Y. Liu *et al.*, "Air quality prediction models based on meteorological factors and real-time data of industrial waste gas," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-13579-2.
- [29] W. Wang and Q. Tang, "Combined model of air quality index forecasting based on the combination of complementary empirical mode decomposition and sequence reconstruction," *Environ. Pollut.*, vol. 316, p. 120628, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120628.
- [30] G. Mani, V. J. Kumar, and A. A. Stonier, "Prediction and forecasting of air quality index in Chennai using regression and Arima time series models," *J. Eng. Res. (Kuwait)*, vol. 10, no. 2A, pp. 179–194, Jun. 2022, doi: 10.36909/jer.10253.
- [31] R. Rakholia *et al.*, "AI-based air quality PM_{2.5} forecasting models for developing countries: A case study of Ho Chi Minh City, Vietnam," *Urban Clim.*, vol. 46, p. 101315, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101315.
- [32] C.-Y. Lin, Y.-S. Chang, and S. Abimannan, "Ensemble multifeatured deep learning models for air quality forecasting," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 12, no. 5, p. 101045, May 2021, doi: 10.1016/j.apr.2021.03.008.
- [33] J. Yang *et al.*, "PM_{2.5} concentrations forecasting in Beijing through deep learning with different inputs, model structures and forecast time," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 12, no. 9, p. 101168, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apr.2021.101168.

- [34] L. Bai, Z. Liu, and J. Wang, "Novel hybrid extreme learning machine and multi-objective optimization algorithm for air pollution prediction," *Appl. Math. Model.*, vol. 106, pp. 177–198, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.apm.2022.01.023.
- [35] A. I. Middy and S. Roy, "Pollutant specific optimal deep learning and statistical model building for air quality forecasting," *Environ. Pollut.*, vol. 301, p. 118972, May 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118972.
- [36] T. M. T. Lei *et al.*, "Using Machine Learning Methods to Forecast Air Quality: A Case Study in Macao," *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 9, p. 1412, Sep. 2022, doi: 10.3390/atmos13091412.
- [37] G. Li, Y. Tang, and H. Yang, "A new hybrid prediction model of air quality index based on secondary decomposition and improved kernel extreme learning machine," *Chemosphere*, vol. 305, p. 135348, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135348.
- [38] M. E. Quinteros *et al.*, "Use of data imputation tools to reconstruct incomplete air quality datasets: A case-study in Temuco, Chile," *Atmos. Environ.*, vol. 200, pp. 40–49, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.11.053.
- [39] H. Junninen *et al.*, "Methods for imputation of missing values in air quality data sets," *Atmos. Environ.*, vol. 38, no. 18, pp. 2895–2907, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.02.026.
- [40] N. Y. Yen *et al.*, "Analysis of interpolation algorithms for the missing values in IoT time series: a case of air quality in Taiwan," *J. Supercomput.*, vol. 76, no. 8, pp. 6475–6500, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11227-019-02991-7.
- [41] M. Peña, P. Ortega and M. Orellana, "A novel imputation method for missing values in air pollutant time series data," in *2019 IEEE Latin American Conf. Comput. Intell. (LA-CCI)*, Nov. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/LA-CCI47412.2019.9037053.
- [42] A. Mustafi, A. I. Middy, and S. Roy, "Fuzzy-based missing value imputation technique for air pollution data," *Artif. Intell. Rev.*, Mar. 2022, doi: 10.1007/s10462-022-10168-7.
- [43] H. Shahbazi *et al.*, "A novel regression imputation framework for Tehran air pollution monitoring network using outputs from WRF and CAMx models," *Atmos. Environ.*, vol. 187, pp. 24–33, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.05.055.
- [44] L. M. Rivera-Muñoz *et al.*, "Missing Data Estimation in a Low-Cost Sensor Network for Measuring Air Quality: a Case Study in Aburrá Valley," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 232, no. 10, p. 436, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11270-021-05363-1.
- [45] L. M. Rivera-Muñoz, A. F. Giraldo-Forero, and J. D. Martínez-Vargas, "Deep matrix factorization models for estimation of missing data in a low-cost sensor

- network to measure air quality," *Ecol. Inform.*, vol. 71, p. 101775, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101775.
- [46] O. O. Arowosegbe *et al.*, "Comparing Methods to Impute Missing Daily Ground-Level PM10 Concentrations between 2010–2017 in South Africa," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 7, p. 3374, Mar. 2021, doi: 10.3390/ijerph18073374.
- [47] A. R. Alsaber, J. Pan, and A. Al-Hurban, "Handling Complex Missing Data Using Random Forest Approach for an Air Quality Monitoring Dataset: A Case Study of Kuwait Environmental Data (2012 to 2018)," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 3, p. 1333, Feb. 2021, doi: 10.3390/ijerph18031333.
- [48] K. M. O. V. K. Kekulanadara *et al.*, "Machine Learning Approach for Predicting Air Quality Index," in *2021 Int. Conf. Decision Aid Sci. Appl. (DASA)*, 2021, pp. 622–626, doi: 10.1109/DASA53625.2021.9682221.
- [49] G. Kalaivani and P. Mayilvahanan, "Air Quality Prediction and Monitoring using Machine Learning Algorithm based IoT sensor – A researcher's perspective," in *Proc. 6th Int. Conf. Commun. Electron. Syst. (ICCES)*, Jul. 2021, doi: 10.1109/ICCES51350.2021.9489153.
- [50] K. Saikiran *et al.*, "Prediction of Air Quality Index Using Supervised Machine Learning Algorithms," in *2021 2nd Int. Conf. Adv. Comput., Commun., Embedded Secure Syst. (ACCESS)*, Sep. 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/ACCESS51619.2021.9563323.
- [51] A. Wang *et al.*, "Potential of machine learning for prediction of traffic related air pollution," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 88, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102599.



Capítulo 09

Tecnologías de purificación de aire con soporte en inteligencia artificial

Air Purification Technologies Aided by Artificial Intelligence

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.09>

Érica M. Mesa ¹

Olga P. Bedoya ²

Paola M. Ortiz ³

Edilson Delgado-Trejos ⁴

¹ Estudiante de Tecnología en Control de la Calidad, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-0713-3677, correo electrónico ericamesa290226@correo.itm.edu.co

² Docente de cátedra, Laboratorio AMYSOD, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0001-7107-710X, correo electrónico olgabedoya8561@correo.itm.edu.co

³ Docente investigadora, Departamento de Eléctrica, Facultad de Ingenierías, Institución Universitaria Pascual Bravo, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-1454-9697, correo electrónico: paola.ortiz@pascualbravo.edu.co

⁴ Profesor titular, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-4840-478X, correo electrónico edilsondelgado@itm.edu.co

Resumen. La contaminación del medioambiente se constituye en una problemática global debido a la cantidad de material particulado en el aire que afecta considerablemente la salud humana. En este trabajo, se revisan sistemas y modelos que se han aplicado para lograr la comprensión del problema y el estado del arte al que se ha llegado en la literatura. La metodología consiste en la revisión de documentos científicos con enfoque en los avances logrados en tecnologías de purificación del aire y se identifican las más utilizadas y los sistemas específicos de generaciones de iones, con el fin de discutir alrededor de diversas soluciones. El criterio y la justificación de la información seleccionada en este estudio se sustentaron en preguntas de investigación para la revisión, análisis y discusión. Así, este trabajo reporta el estado de actualidad de las técnicas y desarrollos, como también los vacíos que abren puertas para nuevos estudios en aras de mejorar el estado de la técnica. Se presta especial atención a aquellos modelos y sistemas que resulten ser de bajo costo, en comparación con otros que exigen estudios e implementaciones con mayores requerimientos tecnológicos.

Palabras clave: contaminación ambiental, generador de iones negativos, generador eléctrico, inteligencia computacional, material particulado, purificación de aire.

Introducción



Los trastornos atmosféricos no solamente afectan la vida y el trabajo de las personas, sino que provocan grandes deterioros en el clima y dificultades significativas al desarrollo sostenible de la economía [1]. La contaminación del aire es el estado atmosférico en el que existen altas concentraciones de elementos pesados que tienen impactos adversos en la salud humana y el ecosistema [2]. Por su parte, el material particulado (PM) hace alusión a los contaminantes en la atmósfera; son compuestos microscópicos de partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire.

El PM está clasificado por el diámetro de sus partículas, de forma que para un diámetro aerodinámico menor a $10\ \mu\text{m}$, se denominan PM₁₀; asimismo, las partículas de diámetro mayor a

2.5 μm se clasifican como partículas gruesas y las comprendidas entre 0.1 y 2.5 μm , son partículas finas catalogadas como PM2.5. La exposición a largo plazo del cuerpo humano en altas concentraciones de PM2.5 conduce fácilmente a diversas patologías [3], por lo que las muertes asociadas a la contaminación del aire representan 4.2 millones por año en todo el mundo [4].

En las últimas dos décadas, las técnicas de inteligencia artificial (IA), representadas en gran proporción por las redes neuronales artificiales (ANN) y otros modelos de máquinas de aprendizaje, han cambiado por completo la forma de investigar la contaminación ambiental debido a sus resultados más precisos y con menores requisitos de conocimiento y datos iniciales [5]. Asimismo, las tecnologías emergentes brindan una oportunidad prometedora para el desarrollo de sistemas de calidad del aire que requieren nuevos modelos, enfoques y mecanismos [6].

La IA es usada para monitorear y anticipar el aumento o reducción de los contaminantes en el aire, al poder identificar posibles razones que causan la contaminación [7]. Recientemente, diferentes aplicaciones de técnicas basadas en IA han sido estudiadas como solución en la purificación del aire, especialmente en espacios interiores, entre las cuales se destacan fotocátalisis de semiconductores [8] y [9], oxidación con ozono [10] y [11], filtración [12], uso de adsorbentes [13], plasma [14], ultravioleta y generación de iones y plasma [15].

Con respecto al uso de ionización del aire para la eliminación de partículas contaminantes en exteriores, se resalta el uso de tecnología de descarga de corona [16], [17]. Sin embargo, el requerimiento de aire con iones negativos en interiores proporciona resultados de purificación de aire con eficiencias superiores [18], [19]. En el estudio presentado en [20] se concluye que los iones negativos cargan partículas mediante la producción de un campo eléctrico

fuerte, de modo que causan movimiento en forma de asentamiento de las partículas cargadas hacia la superficie más cercana.

Se destaca que las tecnologías de filtración alternativas basadas en precipitadores electrostáticos, o generadores de iones negativos, han ganado mayor atención en el ámbito académico debido a un menor nivel de ruido, menor consumo de electricidad, menor costo de mantenimiento y mayor eficiencia energética para la limpieza [21].

En este artículo, se presenta una revisión del estado del arte sobre tecnologías de purificación de aire y análisis de material particulado, con el fin de identificar oportunidades de investigación relacionadas con el apoyo de las máquinas de aprendizaje para diagnóstico o pronóstico. También se busca profundizar, por medio de esta revisión, sobre las tecnologías de purificación de aire basadas en material fibroso, ionización y cargas electrostáticas.

Asimismo, se indagará sobre la formalización en la literatura del uso de la ionización aplicada a la purificación de aire y se explorará su relación con el desempeño de este tipo de tecnologías, en cuanto a evaluación y eficiencia de purificación. El proceso de selección de las fuentes consultadas para incluirlas en este trabajo se derivó de la revisión exhaustiva de reportes científicos en bases de datos especializadas, a fin de considerar pruebas y avances científicos en el marco de las tendencias de investigación.

9.2 Metodología

La metodología para este trabajo consistió en una búsqueda de información sobre las tecnologías de purificación de aire, el uso de la ionización y los medios de generación de iones negativos, donde se incluyó el esfuerzo de la inteligencia artificial mediante el entrenamiento de máquinas de aprendizaje automático para

la obtención de diagnóstico o pronóstico de niveles de contaminación. La búsqueda bibliográfica se hizo en bases de datos especializadas (e.g., Google Scholar, Science Direct, IEEExplore, entre otras), a fin de hallar los referentes conceptuales y tecnológicos. El criterio y la justificación de la información seleccionada, como se ilustra en la figura 9.1, se sustentaron en las siguientes preguntas de investigación para la revisión, análisis y discusión:

- ¿Qué técnicas se emplean convencionalmente para la purificación del aire en exteriores y qué retos se deben enfrentar?
- ¿Cuál es el estado del desarrollo de las tecnologías de purificación de aire basadas en el uso de material fibroso, ionización y cargas electrostáticas?
- ¿Qué oportunidades de integración ofrecen las tecnologías emergentes de inteligencia artificial para mejorar el diagnóstico y pronóstico de los niveles de contaminación?

La clasificación y selección de la información con mayor correspondencia se dirigen a la discusión frente a los vacíos y oportunidades de investigación derivados de las áreas temáticas. La selección final de la documentación quedó constituida por 52 reportes que cubrieron preferencialmente los últimos 8 años, aunque algunos temas requirieron una ventana más amplia entre 2002 y 2022.

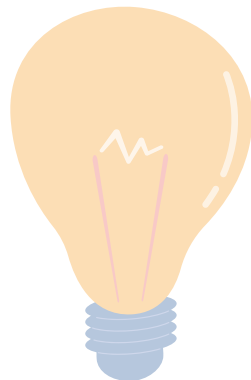
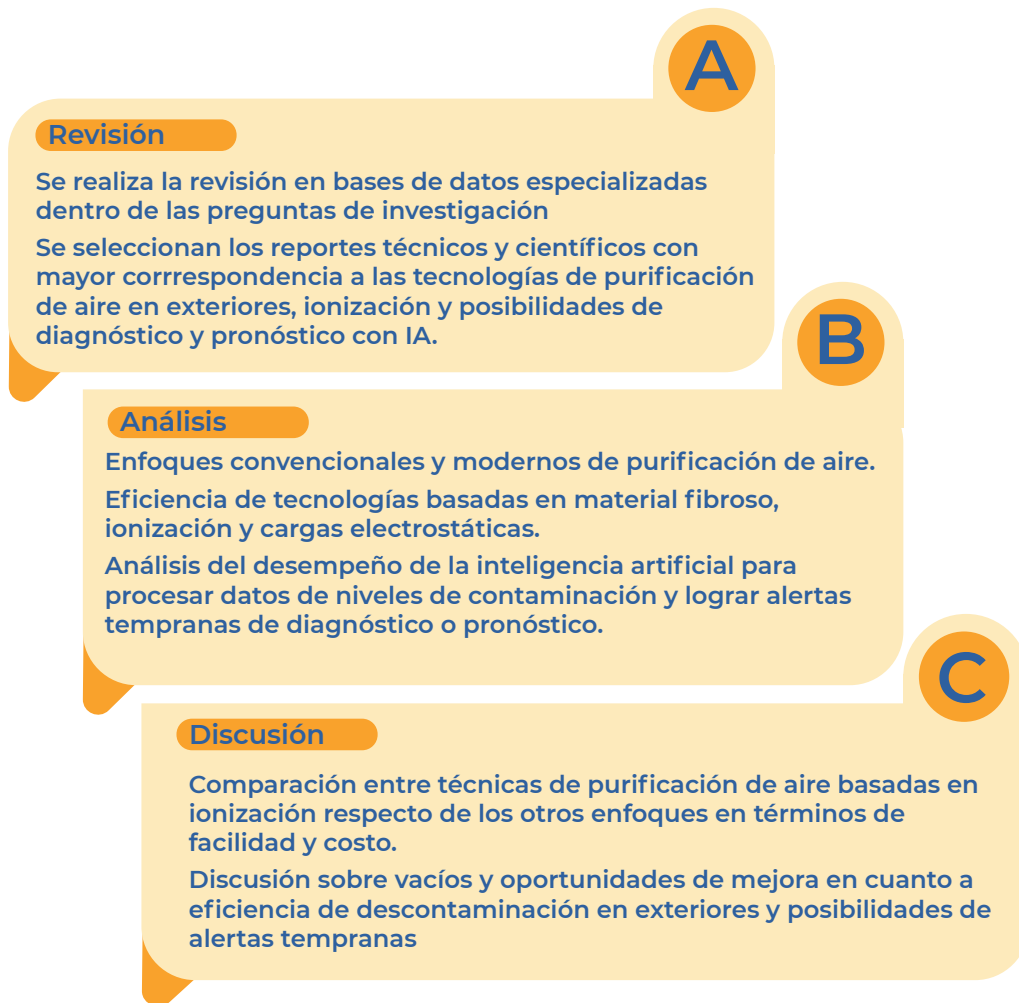


Figura 9.1. Etapas de la metodología de la revisión



Fuente: elaboración propia.

9.3 Contenido de la revisión sistemática

Una de las estrategias para reducir contaminantes atmosféricos es mediante cualquiera de las tecnologías de purificación de aire existentes, las cuales buscan minimizar el material particulado (PM). Para llevar a cabo este proceso, se utilizan diferentes enfoques convencionales y modernos con el fin de aumentar la

eliminación, inactivación o conversión de contaminantes. Los contaminantes tienen diferentes tipos de partículas finas que se encuentran en el aire y en la tabla 9.1 se presentan las tecnologías de purificación más utilizadas para espacios abiertos.

9.4 Efecto de las técnicas de purificación en los principales tipos de contaminantes

Los principales contaminantes del aire se pueden dividir en tres categorías: a) partículas en suspensión, b) contaminantes orgánicos volátiles y c) microorganismos. En la tabla 9.2, se enumera el efecto de las técnicas de purificación individuales en los principales tipos de contaminantes [22]. En términos de suspensión de partículas, las principales tecnologías de purificación son la filtración, la purificación por lavado de agua, la precipitación electrostática y la tecnología de aniones. La filtración es actualmente la técnica de purificación más utilizada para el material particulado.

La purificación más efectiva y comúnmente utilizada es el método de adsorción para gases nocivos. Por su sencillez, efectividad y bajo costo, el carbón activado es el material de adsorción ampliamente utilizado. Además, las tecnologías de limpieza fotocatalítica y de plasma también son efectivas para la depuración de contaminantes orgánicos volátiles. Para la eliminación de microorganismos, el método más eficiente es la luz ultravioleta (UV), seguida de purificación fotocatalítica y de plasma.

Los filtros son más eficaces en el caso de bacterias de mayor diámetro, mientras que no son adecuados para la eliminación de los virus [25]. Con base en las características de las diferentes tecnologías de purificación, se puede observar que el éxito de la aplicación puede verse comprometido en un ambiente perturbado por multiplicidad de contaminantes en el aire.

Tabla 9.1. Tecnologías de purificación del aire para espacios abiertos

Tecnología de purificación del aire	Mecanismos de acción y recolección	Ventajas	Desventajas	Normas de ensayo y métricas de clasificación
Medios de filtración de material fibroso [22], [23].	<ul style="list-style-type: none"> • Las fibras del filtro capturan partículas. • Los medios de filtración mecánica dependen únicamente de las fuerzas mecánicas. • Los medios cargados electrostáticamente usan fibras mecánicas con una carga electrostática aplicada para recolectar partículas con carga opuesta, lo que mejora la eficiencia de recolección 	<ul style="list-style-type: none"> • Si la eficiencia nominal es alta, pueden tener excelentes capacidades de eliminación para partículas de diferentes tamaños. • Los filtros de medios mecánicos mejoran la eficiencia con la carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren reemplazos constantes. • Los filtros de partículas usados pueden ser una fuente de contaminación sensorial/olores. • Caídas de alta presión en algunos medios de filtración de material fibroso pueden afectar negativamente a los sistemas de HVAC. • Los filtros tienen una reducción de su eficiencia bajo cargas [mayores]. • El número de normas de ensayos y métricas de clasificación. 	<p>Filtros:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Norma ANSI/ASHRAE 52.2 (MERV). • ISO 16890 (ePM). • ISO 29463 (HEPA). • Normas de ensayo de patente (FPR, MPR). <p>Purificadores de aire portátiles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AHAM AC-1 (CADR). <p style="text-align: right;"><i>Continúa...</i></p>

Tecnología de purificación del aire	Mecanismos de acción y recolección	Ventajas	Desventajas	Normas de ensayo y métricas de clasificación
Precipitación electrostática [24].	El cable de descarga usa el efecto corona y carga las partículas entrantes, las cuales, a su vez, se acumulan en placas con carga opuesta.	<ul style="list-style-type: none"> • Puede tener una alta eficiencia de remoción para una amplia gama de tamaños de partículas. • Baja caída de presión e impactos mínimos en los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). • Bajos requisitos de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • A veces tienen un alto nivel en la tasa de generación de ozono y de óxido de nitrógeno. • La eficiencia típicamente disminuye con la carga y las placas requieren limpieza rigurosa. • Requieren un alto consumo de energía eléctrica. 	Norma ANSI/UL 867 para seguridad eléctrica y emisiones de ozono (similar a IEC 60335-2-65) (aprobado/no aprobado; sin métrica de clasificación).
Ionizadores (generadores de iones)	El mecanismo de acción es similar al de precipitación electrostática; los ionizadores utilizan un cable de alto voltaje o un cepillo de fibra de carbono para cargar eléctricamente las moléculas de aire, lo cual produce iones negativos que se unen a las partículas suspendidas en el aire; luego, las partículas cargadas se recogen en placas con carga opuesta del purificador de aire o se atraen a otras superficies.	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren un consumo de energía habitualmente bajo. • Es silencioso. • Gastos bajos de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Genera ozono. • Generalmente tiene baja eficacia debido a muy bajas tasas de flujo de aire y tasas de suministro de aire limpio (CADR). 	Ninguna específica para ionizadores, aunque se puede usar la AHAM AC-1 para medir el CADR.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.2. Efecto de la tecnología de purificación en los diferentes tipos de contaminantes

Técnica de purificación	Contaminantes			
	Partículas suspendidas	Contaminantes orgánicos de volatilidad	Microorganismos	
	Polvo, polen, contaminantes secundarios, negro de humo, etc.	Formaldehído, benceno, amoníaco, etc.	Bacteria	Virus
	Diámetro 0.01-100 µm	Diámetro 0.0001-0.001 µm	Diámetro 0.2-10 µm	Diámetro 0.01-0.3 µm
Filtración	Eficaz	No efectivo	Eficaz	No efectivo
Adsorción	Parcialmente efectivo	Alta eficiencia	Parcialmente efectivo	No efectivo
Purificación de lavado de agua	Eficaz	Parcialmente efectivo	No efectivo	No efectivo
Precipitación electrostática	Eficaz	No es obvio	Parcialmente efectivo	No efectivo
Tecnología de aniones	Eficaz	No es obvio	Parcialmente efectivo	No efectivo
Tecnología de purificación por fotocatalisis	No es obvio	Eficaz	Eficaz	Eficaz
Tecnología de limpieza por plasma	No es obvio	Eficaz	Eficaz	Eficaz
Radiación ultravioleta	No efectivo	No efectivo	Alta eficiencia	Alta eficiencia

Fuente: elaboración propia a partir de [25].

Con el fin de maximizar la purificación del aire, es necesario combinar varios métodos con correspondencia particular a los tipos de contaminantes que se suponen presentes. Las ventajas de integrar diferentes tecnologías de purificación son que sus bondades pueden sumarse entre sí, de manera complementaria, como también podrían escalarse en cascada las desventajas de cada una. Por tanto, al adoptar la integración de múltiples tecnologías, sus características deben ser cuidadosamente analizadas para obtener el resultado más adecuado. En particular, las tecnologías que acuden a la contaminación del aire originada a partir de gases de escape industrial pueden integrarse conjugando las características de 3 tipologías: tecnología de eliminación de polvo, tecnología de purificación de gas y de esterilización [25].

9.5 Medios de filtración de material fibroso

Tomando en consideración revisiones de la literatura, en [26] se afirma que los filtros de aire (algunos con carbón activado) reportan un efecto positivo con respecto a la eliminación de partículas, mayores eficiencias de eliminación de partículas más grandes, pero a veces no tan alto como se indica en los datos de los fabricantes, pues el rendimiento de filtración depende del material y diámetro del filtro, y la velocidad del aire [23]. El filtro de policarbonato consta de una superficie muy lisa con orificios capilares rectos, lo que tiene una mayor posibilidad de que puedan pasar partículas más pequeñas que en el tamaño de poro nominal.

Por lo tanto, el filtro de policarbonato evidencia una eficiencia significativamente menor en comparación con otros filtros (por ejemplo, filtro de cloruro de polivinilo). Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) usan filtro de aire comercializado comúnmente para ambientes como los de las bibliotecas y hospitales. Sin embargo, la acumulación de bioaerosoles

recolectados sobre la superficie de estos filtros puede continuar creciendo y reproduciéndose con suficiente humedad, lo que genera una oportunidad de investigación significativa para el desarrollo de nuevas soluciones en este tipo de entornos.

9.6 Parámetro de evaluación de los materiales de filtración de PM

Uno de los parámetros que usualmente se utiliza para evaluar los materiales de filtración es la eficiencia de filtración (E_{PM}):

$$E_{PM} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$

donde C_0 y C_1 son la concentración de PM antes y después del filtro, respectivamente [27]. Incluye en ambos la concentración numérica de las partículas y la concentración en masa. La E_{PM} es uno de los parámetros de evaluación más importantes para los filtros de PM y está relacionado con la estructura del material, el espesor, la porosidad y la velocidad del flujo de aire [28].

9.7 Materiales de filtración avanzada

Existen tipos de materiales de filtración que se han utilizado para la captación de PM. Estos materiales pueden ser presentados de acuerdo con su principio de funcionamiento, así:

- *Polímeros sintéticos*: son de bajo costo y presentan facilidad de modificación. En la tabla 9.3 se incluyen algunos que ofrecen buenos resultados de filtración para PM2.5.

Tabla 9.1. Polímeros sintéticos de uso común para la filtración de PM_{2.5}

Material	Tamaño de partícula [μm]	E_{PM} [%]	ΔP [Pa]	QF [Pa^{-1}]	Ref.
Poliimida (PI)	2.5	99.97	73	0.1072	[29]
Poliestireno (PS)	2.5	99.99	145	0.15	[30]
Poliuretano (PU)	2.5	99.73	28	0.211	[31]
Poliacrilonitrilo (PAN)	2.5	96.12	133	0.024	[32]
Alcohol de polivinilo (PVA)	2.5	96.70	178	0.019	[33]
Polivinilpirrolidona (PVP)	2.5	95	101	0.029	[34]
Ácido poliacrílico (PAA)	2.5	99.6	146.3	0.034	[35]
Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	2.5	98.16	30	0.120	[36]

Fuente: elaboración propia.

- *Polímeros naturales:* se derivan de sustancias primarias extraídas de la biomasa y su característica más importante es su amigabilidad con el medioambiente.
- *Estructuras metalorgánicas porosas (MOF):* ampliamente utilizadas por su porosidad ultraalta, tamaño de poro controlable, alta estabilidad térmica y química.
- *Materiales basados en carbono:* poseen numerosos sitios de absorción activa, alta área de superficie específica y porosidad.
- *Otros materiales:* entre estos se pueden listar las nanofibras inorgánicas y los nanocables metálicos, que también han sido utilizados para remover PM. Los compuestos inorgánicos poseen una gran estabilidad térmica y química.

9.8 Precipitación electrostática (ESP)

Una de las tecnologías de purificación de aire más usadas es la precipitación electrostática (ESP), la cual es tomada también como

antecedente de las tecnologías basadas en ionizadores. En [24] se concluye que la ESP tiene la capacidad de reducir efectivamente las concentraciones de PM10 en un promedio de 57 % y las concentraciones de PM2.5 en un promedio de 45.3 %, en un sistema donde la tasa de emisión de ozono del filtro de aire ESP con rociador de iones se midió dentro de la cámara cerrada y la concentración de ozono disminuyó de 2.39 a 1.29 ppb después de 12 h de operación continua.

Este resultado indica que las nuevas tecnologías de ESP con rociador de iones emiten niveles de ozono comparativamente bajos, donde los cargadores de fibra de escobillas de carbón sin placas conectadas a tierra son clave para lograr emisiones de ozono cercanas a cero. Los resultados obtenidos con el rociador de iones en un entorno real de 56.43 m³ arrojaron que la tasa de suministro de aire limpio (CADR) de partículas fue de 0.798 m³/min, similar al resultado de la prueba de la cámara. Por lo tanto, el rendimiento del ESP con rociador de iones propuesto fue mejor que el del filtro de aire particulado de alta eficiencia (HEPA), contrarrestando el inconveniente de los filtros de aire ESP convencionales existentes.

9.9 Efecto sinérgico de integración de tecnologías de purificación de aire

El efecto sinérgico surge entre dos o más agentes, factores o sustancias que pueden producir un efecto mayor que la suma de sus efectos individuales [37]. Aprovechar el efecto sinérgico puede ayudar a evitar las consecuencias adversas que podría producir la combinación de múltiples tecnologías de purificación de aire. Del mismo modo, se pueden maximizar las fortalezas y minimizar las debilidades de las técnicas de purificación individuales, como sucede con la catálisis fotoquímica de adsorción y la fotocatalisis de plasma no térmico, entre otros [25].

En particular, la velocidad de la reacción fotocatalítica es lenta cuando la concentración de contaminantes en el interior es baja. La integración de la adsorción y la catálisis fotoquímica puede mejorar la velocidad de la reacción catalítica, ya que la adsorción proporciona fotocatalisis con concentraciones relativamente altas de contaminantes en interiores. Por tanto, la degradación por fotocatalisis de contaminantes concentrados realiza la regeneración *in situ* del adsorbente [38], [39].

9.10 Sistemas de medición y monitoreo

El desarrollo de sistemas de medición y monitoreo de variables ambientales relacionadas con la calidad del aire es un punto de inflexión en el progreso de las tecnologías de purificación de aire, dado que los avances reportados en la literatura relacionados con la resolución, precisión y robustez en la medición de los sensores permiten esquemas de solución en los entornos adversos que han sido el impedimento del perfeccionamiento de las técnicas. Asimismo, la conexión y la velocidad de transmisión de los equipos de medición a los centros de almacenamiento de los datos han sido mejoradas notablemente con la integración de los avances que permite el internet de las cosas (IoT), además de la accesibilidad de la información, pudiendo ser adecuados a sistemas de medición en tiempo real de variables como temperatura, humedad, presión atmosférica, densidad de polvo y concentraciones de monóxido, dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno.

En [40], se reporta la integración de un sistema en el que los datos obtenidos por los sensores son procesados mediante un microcontrolador, el cual establece comunicación inalámbrica con un servidor web que, por medio del protocolo MQTT (message queuing telemetry transport), facilita la inserción de información en un sistema para la gestión de datos NoSQL o no relacional MongoDB. Se

evidencia gran eficiencia de este tipo de sistemas a la hora de analizar e interpretar los datos registrados, ya que se puede visualizar la información en un servidor web, proporcionando la opción de interactuar de manera sencilla con los datos que se recopilan.

Los sistemas IoT han tenido gran repercusión en las tecnologías de calidad del aire, integrando redes de sensores inalámbricos WSN (wireless sensor networks) de bajo consumo de energía, de uso flexible, y con conexión a un servidor, para capturar grandes volúmenes de información ambiental, a fin de proponer estrategias de descontaminación del aire adaptables a los cambios para la toma de decisiones [41]. La información puede presentar altos niveles de ruido; por lo tanto, es necesario dotar el sistema de una etapa de preprocesamiento (adecuación, filtración, segmentación, etc.), a fin de alistar el conjunto de registro de datos conforme a los requerimientos de las técnicas de procesamiento. Luego, se procesan los datos y se analizan en un servidor web IoT, con el fin de identificar el estado del aire en tiempo real.

Generalmente, es necesario profundizar en los principales contaminantes del aire y ajustar el procesamiento de datos asociados con estos contaminantes. En este mismo sentido, se han propuesto sistemas de alarma por medio de servidores web, mediante el envío de señales de control cuando la calidad del aire cae por debajo de un límite específico, permitiendo visualizar la dinámica de contaminación en tiempo real desde un dispositivo móvil. Estos enfoques se complementan con la vinculación de procesos de cómputo para pronosticar el nivel de contaminación en horizontes de predicción que permitan respuestas por las autoridades competentes en cuanto a las acciones de control preventivas [42].

Con el fin de superar las limitaciones de corta distancia y alto consumo de energía que presentan las tecnologías inalámbricas, se ha reportado el uso de redes de área amplia y baja potencia

(LPWAN), las cuales permiten comunicaciones inalámbricas de largo alcance a una tasa de bits baja utilizando un bajo consumo de energía para mayor velocidad de datos y tamaño de carga útil. En 2010, la tecnología de modulación de radio LoRa fue desarrollada por la empresa Cycleo y luego contó con el respaldo de LoRa Alliance. LoRa es la abreviatura de largo alcance, que es un tipo de tecnología de comunicación LPWAN. En 2013, Semtech impulsó la tecnología de transmisión de datos con alcance de ultralarga distancia y baja potencia.

Esto hizo posible el equilibrio entre tener una tecnología de comunicación que no solamente pudiera soportar largas distancias, sino que se lograra con un bajo consumo de energía, además de costar menos que otras tecnologías. Recientemente, se han reportado usos de WSN aplicados en sistemas de monitoreo de calidad del aire, donde se ha propuesto la toma de decisiones sobre redes de área local (LAN) para el monitoreo local, generando una alarma mientras hay alerta de contaminación, además del uso de redes de área amplia (WAN) para el control remoto y seguimiento [29]. El progreso de las tecnologías que integran IoT con dispositivos inteligentes y sensores que pueden comunicarse entre sí, siempre accesibles a pesar de su ubicación, ha impulsado la creación de cada vez más aplicaciones que usan WSN conectadas a un servidor en la nube con servicios que tienen capacidades de monitoreo, análisis y procesamiento de datos.

9.11 Tecnologías que incluyen inteligencia artificial

Las nuevas tecnologías de adquisición, medición y procesamiento de datos vinculan rutinas de aprendizaje con el fin de automatizar procesos complejos, donde se busca optimizar el esfuerzo

computacional, mientras se logra aumentar la capacidad de representación de las dinámicas fenomenológicas.

De acuerdo con las técnicas de inteligencia artificial utilizadas para mejorar los procesos de medición de material particulado en el aire, se han reportado enfoques que buscan estimar los datos faltantes en colecciones grandes de mediciones por medio de redes de sensores inalámbricos de bajo costo que estiman la cantidad de PM_{2.5}, de manera que los datos puedan ser usados en procesos de cómputo con fines de análisis, exploración y soporte de decisión.

En [43] se reporta una exploración sobre la mejor configuración de parámetros para un modelo de estimación de datos faltantes, tomando en consideración el análisis de sensibilidad y una comparación del rendimiento del algoritmo con otros modelos conocidos como k vecinos más cercanos (KNN) y procesos gaussianos multiobjetivo (MOGP). Adicionalmente, se propuso la aplicación de una factorización matricial (MF) en la cual se analizaron las mediciones de la calidad del aire según los datos recolectados de varios sensores inalámbricos. Cuando la MF se complementa con técnicas de regularización, el modelo puede lograr soluciones deseadas, incluso en presencia de una gran cantidad de datos faltantes, recuperando alrededor de 40 % y 45 % de ellos [44], [45].

En el procesamiento inteligente de datos con fines de purificación de aire se han propuesto enfoques de alto rendimiento para la cuantificación de material particulado, donde se clasifican imágenes de resolución microscópica de aerosoles en el aire por medio de una plataforma móvil, la cual mide la calidad del aire en diferentes ambientes, tanto interiores como exteriores.

En [46] se establecen rutinas de procesamiento de imágenes sobre sistemas embebidos y un método de análisis de partículas

por medio de máquinas de aprendizaje, donde se analizó el desempeño de un sistema de monitoreo de la calidad del aire liviano (~590 g), portátil y rentable, denominado c-aire, el cual utiliza microscopía computacional sin lentes integrada al aprendizaje automático. Esta plataforma tiene la ventaja de filtrar 6 litros de volumen de aire en 30 segundos, generando imágenes microscópicas de fase y amplitud de las partículas capturadas, al tiempo que proporciona automáticamente el PM con una precisión de tamaño de 93 %.

El monitoreo de la calidad del aire es fundamental para determinar en qué circunstancias se encuentra una población particular y, dependiendo de los niveles, encender alarmas que involucren el inicio de medidas de descontaminación, pues esto repercute de manera significativa en la salud y bienestar de las personas.

En este sentido, es relevante comprender aquellos factores que generan mayor contaminación, mediante el procesamiento inteligente de datos y, con esto, estudiar variables que permitan contrarrestar la contaminación del aire, aunque se ha identificado que algunos instrumentos de medición resultan ser poco eficientes a la hora de proporcionar resultados precisos, debido a la movilidad de los dispositivos, ya que muchos son pesados, costosos y requieren de condiciones muy específicas para operar, lo que se convierte en una dificultad para la toma de decisiones de la calidad del aire en una situación particular.

De esta manera, siguen abiertas en la literatura las oportunidades de investigación para seguir mejorando el rendimiento y precisión de las mediciones cuando se tienen escenarios adversos, pues es especialmente importante lograr mediciones rápidas y altamente sensibles en el recuento de partículas en bajas concentraciones de aire.

Existen muchos inconvenientes para medir la calidad del aire en grandes extensiones de espacio por los diferentes factores externos que pueden afectar la medida. Para analizar el índice de calidad del aire, se han propuesto técnicas de predicción basadas en el método de *splines* de regresión adaptativa multivariante (MARS), lográndose una mayor precisión frente a otros métodos de aprendizaje como el Random Forest Classification, ya que requiere de un número reducido de variables características definidas.

La ventaja más significativa de este modelo es que paralelamente ayuda a reducir el número de valores atípicos; por lo tanto, resulta ser muy eficiente a la hora de predecir datos [47]. En general, la literatura recoge el análisis de diversos modelos de predicción de la calidad del aire, en los que se destaca el modelo AirQP-DNN, reportado en [48], el cual consiste en obtener la predicción valiéndose de una red neuronal de gran precisión entrenada por medio de datos históricos, datos actuales y datos de pronóstico del tiempo.

Este modelo resulta ser muy eficiente en comparación con otros, ya que está compuesto por un predictor de tiempo, un predictor espacial y un operador de combinación de predicciones que, por medio de un árbol de clasificación y regresión, combina los datos, logrando menos costo computacional. Los resultados mostraron precisión en la predicción para tres modelos de serie de tiempo, a saber: *AutoRegressive Integrated Moving Average* (Arima), *Gradient Boosted Decision Tree* (GBDT) y *Long Short-Term Memory* (LSTM).

Tomando como base los diversos modelos encontrados en la literatura que han contribuido al desarrollo de dispositivos para monitorear la calidad del aire, se identifican técnicas de aprendizaje automático basadas en topologías de redes neuronales artificiales (ANN) y lógica difusa, con el objetivo de inferir y monitorear el índice de la calidad del aire, las cuales consideran dentro

de los resultados de ejecución la incertidumbre, la imprecisión, la aproximación y la verdad parcial [49], donde es frecuente encontrar resultados promisorios de clasificación y análisis predictivo.

También, se identifica la aplicación del filtro Kalman como un algoritmo recursivo de procesamiento de datos óptimo, con capacidad de incorporar toda la información disponible, procesar las medidas observables y estimar los parámetros actuales a partir de unos previamente estimados. Otro método se basa en la estructura de árbol de decisión, el cual reporta una precisión moderada/alta con un bajo costo operativo; el principal inconveniente es que tiene una capacidad limitada para manejar variaciones a gran escala en las concentraciones de contaminantes. Asimismo, se ha propuesto la integración de estas técnicas con dispositivos de manufactura avanzada como los sistemas microelectromecánicos (MEMS), que son de bajo costo, fácil manejo y efectivos, con la ventaja de detectar las partículas de un tamaño alrededor de 100 nm.

Tomando en consideración los modelos de calibración de PM_{2.5} utilizando aprendizaje automático, se han reportado enfoques basados en redes de aprendizaje, como la red neuronal Hybrid LSTM, la cual combina una red neuronal profunda (DNN) optimizada en problemas de calibración y una red neuronal de memoria a corto plazo (LSTM) optimizada en características dependientes del tiempo para mejorar el desempeño de las rutinas de calibración convencionales en el caso de sensores de PM de bajo costo. La hibridación logra una alta precisión en los sensores de bajo costo, con lo cual se obtiene un rendimiento de calibración de última generación [50].

9.12 Consideraciones finales

Dentro de las consideraciones finales de este capítulo es importante incluir el análisis de las principales funciones y características que ofrecen los diversos dispositivos de purificación de aire, de acuerdo con dos categorías de precios diferentes: a) clase de precio asequible (*affordable price class*, APC) y b) clase de precio alto (*high price class*, HPC). Según estas categorías, se establece que los purificadores HPC tienen un mejor rendimiento en cuanto a sus especificaciones técnicas; por ende, estos purificadores de aire cuentan con filtros de alta eficiencia, donde se destacan los filtros tipo HEPA (*high efficiency particle arresting*).

Actualmente, para la categoría APC, hay una variedad significativa de purificadores de aire, que permiten contrarrestar la contaminación mediante desarrollos novedosos en los que cobran mucha importancia los beneficios en cuanto a tamaño y eficiencia. Es importante anotar que la eficiencia de estos purificadores es estimada mediante experimentos de recolección de material particulado de un PAP (*portable air purifier*) que previamente ha sido examinado en busca de partículas con diámetros definidos en el rango de una sala de prueba con diferentes modos de operación, a fin de efectuar comparaciones de desempeño, de forma que el monitoreo real para cada una de las pruebas se logra mediante la aplicación de redes de sensores inalámbricos [51].

En cuanto al uso de la inteligencia artificial, particularmente los métodos de aprendizaje automático para predecir y alertar sobre la contaminación en áreas urbanas, se reporta el uso frecuente tanto de rutinas de aprendizaje supervisado como no supervisado. En la sección inmediatamente anterior se hizo referencia a las técnicas supervisadas; sin embargo, teniendo en cuenta las técnicas no supervisadas, algunos autores [52] combinan el modelo *Deep Belief Networks* (DBN) y una máquina de soporte vectorial para una sola

clase (OCSVM), a fin de obtener mediciones de ozono sin etiquetar, de manera que sea posible realizar el análisis de las variaciones no lineales de las concentraciones de ozono al nivel del suelo.

De esta forma se busca predecir la calidad del aire en un espacio y tiempo desconocidos, a partir del suministro de un sistema de información geográfica (SIG). Asimismo, se agregaron características geográficas como la población, el uso de la tierra, la economía, las fuentes de contaminación y los parámetros del terreno dentro de la serie temporal. Primero se ejecutó la predicción temporal en las estaciones de referencia y luego se usó el índice de calidad del aire (AQI) pronosticado para inferir espacialmente el AQI futuro de ubicaciones desconocidas. El modelo DBN-OCSVM evidenció buenos resultados en las mediciones de ozono en comparación con resultados obtenidos con las máquinas de Boltzmann restringidas (RBM) y los algoritmos Birch y K-Means basado en autoencoders apilados profundos (DSA) y maximización de la esperanza (EM).

La verificación indicó una alta precisión para la predicción temporal a corto plazo. Se observó que varios efectos meteorológicos y climáticos influyeron en la diferencia estacional. En la etapa de inferencia espacial, la urbanización y los tipos de ciudad fueron características espaciales que reportaron afectación en la calidad del aire. El uso agrícola y forestal, el uso del transporte, el uso residencial y los factores económicos estuvieron claramente correlacionados con los AQI, mientras que la población y la fuerza laboral no lo estuvieron.

9.13 Conclusiones

Este capítulo discute sobre tecnologías de purificación de aire en exteriores, las cuales han ido en aumento por hacer parte de un problema compartido en todo el mundo, como es la contamina-

ción ambiental; la investigación científica tiene la obligación de llevar propuestas de mitigación en el horizonte cercano, por medio de soluciones accesibles, económicas, transportables y efectivas.

El trabajo consistió en una revisión exhaustiva de reportes científicos sobre bases de datos especializadas, a fin de considerar las tendencias investigativas con enfoque en los avances logrados para la purificación del aire, en los que se identificaron como importantes aquellas técnicas basadas en material fibroso, procesos de ionización y cargas electrostáticas, además de destacar las más utilizadas en la medición y monitoreo de la calidad del aire con ayuda de la inteligencia artificial, las que identificaron vacíos que abren puertas a nuevos desarrollos que apunten a mejorar el estado de la técnica.

Se encontró que los medios de filtración de material fibroso tienen la ventaja de contar con alta capacidad de eliminación de partículas a diferentes tamaños, siempre y cuando se asegure una eficiencia nominal alta, aunque ocurran reemplazos constantes. Por su parte, la precipitación electrostática tiene la ventaja de poseer una alta eficiencia de remoción de contaminantes para una amplia gama de tamaños con bajos requisitos de mantenimiento, pero su eficiencia, habitualmente, requiere de alto consumo de energía eléctrica y se disminuye en forma proporcional con la carga.

En contraste, los ionizadores se caracterizan por un consumo de energía usualmente bajo, además de requerir poco mantenimiento. En general, para las dos últimas se deben tener en cuenta restricciones de tipo fenomenológico relacionadas con la generación de ozono, y otras de tipo operacional relacionadas con la limpieza de las placas. De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que, si las técnicas de filtración de aire basadas en ionizadores se usan correctamente y de manera controlada según el área de aplicación, se pueden lograr contribuciones notables dirigidas a la obtención

de ambientes más saludables para las personas, sin impactos negativos.

Sin embargo, dado que existe escasa literatura que proporcione información teórica y formalizada sobre estrategias de generación eficiente de iones negativos con aplicación a la captura de material particulado en el aire, se necesita con urgencia explorar, caracterizar y formalizar la dinámica de operación de este tipo de tecnologías, que permitan la evaluación y eficiencia de purificación, para contribuir al mejoramiento tecnológico.

De esta forma, se abren posibilidades de investigaciones orientadas al progreso de nuevas alternativas enfocadas a la generación de iones negativos con mayor eficiencia energética, sin dejar de lado las maneras novedosas en que se puedan integrar esos desarrollos en monturas de bicicleta, vehículos automotores o en techos cercanos a las chimeneas contaminantes.

Es importante notar que las técnicas de purificación de aire, por novedosas y efectivas que sean, no son exitosas por sí mismas, sino que la multiplicidad de contaminantes presentes en el aire exige la combinación de las bondades que se puedan lograr del uso de diferentes métodos, tomando precaución de que las fortalezas pueden tomar el efecto sinérgico de integración de las técnicas, sin descartar que también pudieran escalarse en cascada las desventajas de cada una.

En efecto, las tecnologías emergentes basadas en inteligencia computacional y técnicas soportadas en analítica de datos pueden ser cuidadosamente integradas en función de resultados más efectivos y de bajo costo. Asimismo, la vinculación de protocolos inalámbricos como wifi y 5G, además del acceso a centros de almacenamiento dinámico en la nube, ayudan a que la recolección

de los datos se pueda tener disponible en tiempo real y, de esa manera, procesar la información de forma sincrónica al tiempo de adquisición para proveer resultados de alertas tempranas en cuanto a niveles de contaminación de un sector específico.

Estas rutinas de procesamiento sobre la nube en tiempo real siguen abiertas en la literatura para que, con nuevas investigaciones, se puedan lograr metodologías que incrementen los niveles de efectividad, consistencia y robustez.

En cuanto a las técnicas de aprendizaje para predecir la calidad del aire en tiempo real, estas tienen desafíos relacionados con el monitoreo basado en matrices de alta dimensión, que exige dispositivos capaces de cuantificar concentraciones que integren información relacionada con los principales factores ambientales.

Actualmente, no se han establecido factores determinantes en este proceso, por lo que resulta conveniente lograr híbridos de los modelos existentes en función de mejores resultados, de forma que se requiere aumentar el esfuerzo en el desarrollo de dispositivos que proporcionen concentraciones precisas, constituyéndose en un gran reto en los ejercicios investigativos.

Asimismo, es clave resaltar que la integración de redes de sensores con tecnologías de IoT permite la accesibilidad a la información desde cualquier punto, independientemente de dónde se encuentre ubicado el sensor, habilitando el procesamiento en tiempo real de los datos recopilados.

Así, las rutinas de aprendizaje para estimar o predecir la calidad del aire en tiempo real enfrentan desafíos relacionados con un monitoreo capaz de superar las perturbaciones, los retardos de medición y la conexión permanente y continua del flujo de datos en los canales de comunicación, así que resulta conveniente tener

como base los distintos modelos en función de crear hibridaciones restringidas a funciones que optimicen los procesos para el aseguramiento de la validez de los resultados.

Agradecimientos

Este documento se hizo dentro de un trabajo de grado de Tecnología en Control de la Calidad en la modalidad procesos de investigación en el Semillero Metrología Científica del Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción, en el Laboratorio Análisis de Medición y Soporte de Decisión (AMYSOD) de la Institución Universitaria ITM de Medellín.

Declaración de conflicto de intereses

En aras de la transparencia, se declara por parte de los investigadores y participantes del proyecto, no presentar ningún conflicto que involucrara los intereses en la realización del proyecto, durante o posterior a la realización de este, de índoles comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

Según la Resolución 008430 de 1993 por el Ministerio de Salud, la presente investigación no presentó riesgos de ningún tipo (biológico, ambiental o ético) que pudiera afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno o la sociedad ni al medioambiente. Se informa que en ningún momento de la investigación se realizaron pruebas en humanos o animales y en ninguna etapa o actividad se contempló la interacción con pacientes ni la manipulación de información confidencial, puesto que los procedimientos fueron de tipo computacional sobre bases de datos especializadas y, por ende, no se estima necesario el aval de un comité de ética.

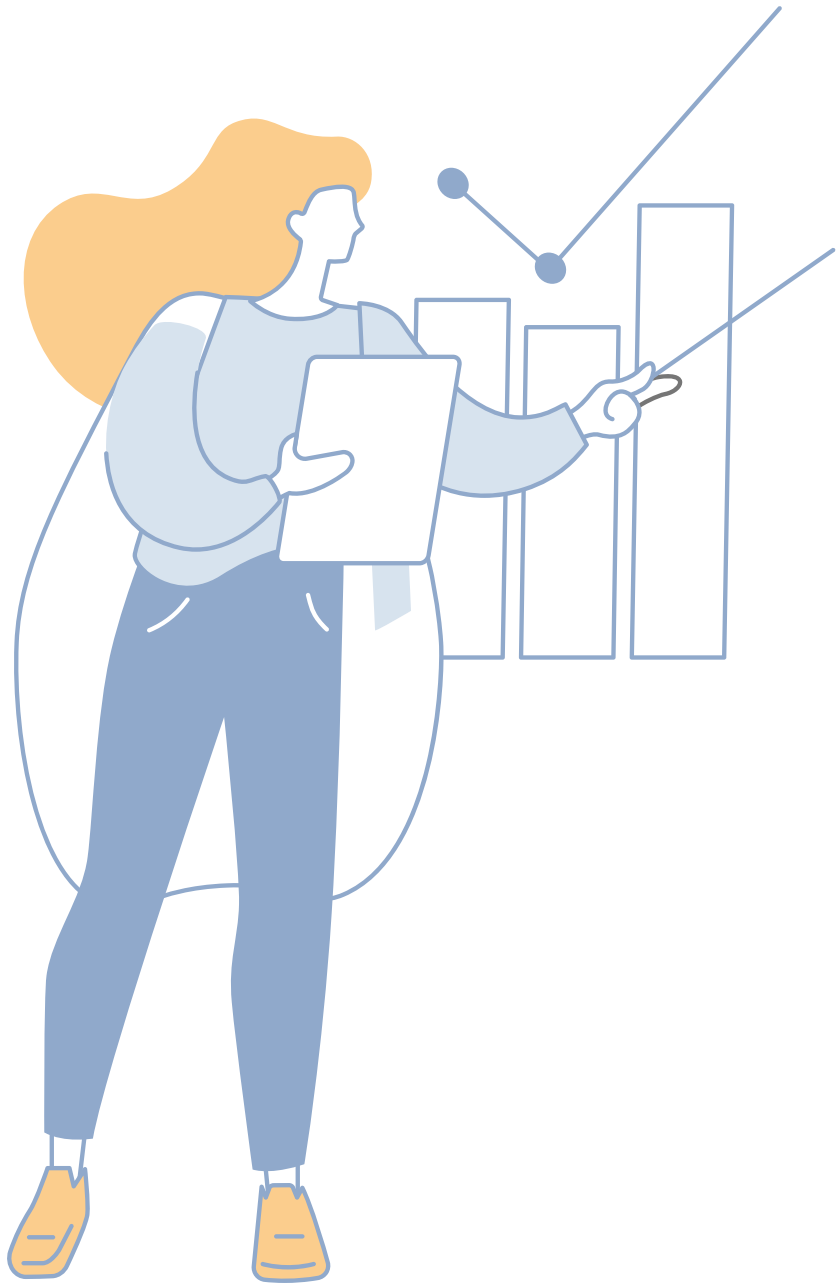
Referencias

- [1] W. Huang *et al.*, "An overview of air quality analysis by big data techniques: Monitoring, forecasting, and traceability," *Inf. Fusion*, vol. 75, pp. 28–40, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.inffus.2021.03.010.
- [2] S. S. Al-Alola *et al.*, "Air quality estimation using remote sensing and GIS-spatial technologies along Al-Shamal train pathway, Al-Qurayyat City in Saudi Arabia," *Environ. Sustain. Indic.*, vol. 15, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.indic.2022.100184.
- [3] Y. C. Lin, W. J. Chi, and Y. Q. Lin, "The improvement of spatial-temporal resolution of PM_{2.5} estimation based on micro-air quality sensors by using data fusion technique," *Environ. Int.*, vol. 134, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2019.105305.
- [4] B. F. O'Leary *et al.*, "Air quality monitoring and measurement in an urban airshed: Contextualizing datasets from the Detroit Michigan area from 1952 to 2020," *Sci. Total Environ.*, vol. 809, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152120.
- [5] Y. Li *et al.*, "Air quality forecasting with artificial intelligence techniques: A scientometric and content analysis," *Environ. Model. Softw.*, vol. 149, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.envsoft.2022.105329.
- [6] M. S. Hadj Sassi and L. Chaari Fourati, "Comprehensive survey on air quality monitoring systems based on emerging computing and communication technologies," *Comput. Netw.*, vol. 209, May 2022, doi: 10.1016/j.comnet.2022.108904.
- [7] A. Almalawi *et al.*, "An IoT based system for magnify air pollution monitoring and prognosis using hybrid artificial intelligence technique," *Environ. Res.*, vol. 206, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.envres.2021.112576.
- [8] P. Chen *et al.*, "Directional electron delivery and enhanced reactants activation enable efficient photocatalytic air purification on amorphous carbon nitride co-functionalized with O/La," *Appl. Catal. B*, vol. 242, pp. 19–30, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apcatb.2018.09.078.
- [9] X. Qian *et al.*, "Design and Functionalization of Photocatalytic Systems within Mesoporous Silica," *ChemSusChem*, vol. 7, no. 6, pp. 1528–1536, 2014, doi: 10.1002/cssc.201400111.

- [10] C. W. Kwong *et al.*, "Removal of VOCs from indoor environment by ozonation over different porous materials," *Atmos. Environ.*, vol. 42, no. 10, pp. 2300–2311, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.030.
- [11] M. S. Waring, J. A. Siegel, and R. L. Corsi, "Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners," *Atmos. Environ.*, vol. 42, no. 20, pp. 5003–5014, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.011.
- [12] G. Bekö *et al.*, "Sensory pollution from bag-type fiberglass ventilation filters: Conventional filter compared with filters containing various amounts of activated carbon," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 10, pp. 2114–2120, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.03.002.
- [13] A. Monpezat *et al.*, "Evaluation Methods of Adsorbents for Air Purification and Gas Separation at Low Concentration: Case Studies on Xenon and Krypton," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 11, pp. 4560–4571, Mar. 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.8b04866.
- [14] J. van Durme *et al.*, "Efficient toluene abatement in indoor air by a plasma catalytic hybrid system," *Appl. Catal. B*, vol. 74, no. 1–2, pp. 161–169, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.apcatb.2007.02.006.
- [15] K. Nishikawa and H. Nojima, "Air purification effect of positively and negatively charged ions generated by discharge plasma at atmospheric pressure," *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 Lett.*, vol. 40, no. 8A, pp. L835–L837, 2001, doi: 10.1143/jjap.40.l835.
- [16] S. S. Nunayon *et al.*, "Experimental evaluation of positive and negative air ions disinfection efficacy under different ventilation duct conditions," *Build. Environ.*, vol. 158, pp. 295–301, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.05.027.
- [17] R. Huang *et al.*, "Removal of viable bioaerosol particles with a low-efficiency HVAC filter enhanced by continuous emission of unipolar air ions," *Indoor Air*, vol. 18, no. 2, pp. 106–112, Apr. 2008, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00512.x.
- [18] J. Černecký *et al.*, "Ionization Impact on the Air Cleaning Efficiency in the Interior," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 156–166, 2015, doi: 10.1515/msr-2015-0023.
- [19] B. Shabani *et al.*, "Poisoning of proton exchange membrane fuel cells by contaminants and impurities: Review of mechanisms, effects, and mitigation strategies," *J. Power Sources*, vol. 427, pp. 21–48, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.097.
- [20] A. Nadali *et al.*, "Indoor and outdoor concentration of PM10, PM2.5 and PM1 in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM

- removal," *Air Qual. Atmos. Health*, vol. 13, no. 1, pp. 47–55, Jan. 2020, doi: 10.1080/26395940.2020.1728198.
- [21] F. Xu *et al.*, "Experimental investigation on charging characteristics and penetration efficiency of PM_{2.5} emitted from coal combustion enhanced by positive corona pulsed ESP," *J. Electrostat.*, vol. 67, no. 5, pp. 799–806, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.elstat.2009.06.002.
- [22] Y. Zhang *et al.*, "Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review," *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 26, pp. 4329–4343, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.041.
- [23] L. Song *et al.*, "Airborne pathogenic microorganisms and air cleaning technology development: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 424, p. 127429, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127429.
- [24] J. H. Sung *et al.*, "Ultrafine particle cleaning performance of an ion spray electrostatic air cleaner emitting zero ozone with diffusion charging by carbon fiber," *Build. Environ.*, vol. 166, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106422.
- [25] G. Liu *et al.*, "A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 32, pp. 375–396, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.04.011.
- [26] Y. Zhang *et al.*, "Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review," *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 26, pp. 4329–4343, 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.041.
- [27] C. Y. Chen, "Filtration of Aerosols by Fibrous Media," *Chem. Rev.*, vol. 55, no. 3, pp. 595–623, 1955, doi: 10.1021/cr50003a004.
- [28] W. W. F. Leung, C. H. Hung, and P. T. Yuen, "Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 71, no. 1, pp. 30–37, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.seppur.2009.10.017.
- [29] R. Zhang *et al.*, "Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM_{2.5} removal from the pollution sources," *Nano Lett.*, vol. 16, no. 6, pp. 3642–3649, Jun. 2016, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b00771.
- [30] A. Rajak *et al.*, "Electrospun nanofiber from various source of expanded polystyrene (EPS) waste and their characterization as potential air filter media," *Waste Manag.*, vol. 103, pp. 76–86, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.12.017.
- [31] F. Zuo *et al.*, "Free-Standing Polyurethane Nanofiber/Nets Air Filters for Effective PM Capture," *Small*, vol. 13, no. 46, p. 1702139, Dec. 2017, doi: 10.1002/smll.201702139.

- [32] C. Liu *et al.*, "Vertical single or few-layer MoS nanosheets rooting into TiO nanofibers for highly efficient photocatalytic hydrogen evolution," *Appl. Catal. B*, vol. 164, pp. 1–9, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apcatb.2014.08.046.
- [33] Q. Zhang *et al.*, "A Novel Method for Fabricating an Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)/Cellulose Nanocrystals Composite Nanofibrous Filter with Low Air Resistance for High-Efficiency Filtration of Particulate Matter," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 9, pp. 8706–8714, May 2019, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b00605.
- [34] S. Lu, C. Li, R. Liu, and A. Lv, "PVP-Assisted Shellac Nanofiber Membrane as Highly Efficient, Eco-Friendly, Translucent Air Filter," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 23, p. 11094, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112311094.
- [35] J. Guo *et al.*, "PAA@ZIF-8 incorporated nanofibrous membrane for high-efficiency PM2.5 capture," *Chem. Eng. J.*, vol. 405, p. 126584, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126584.
- [36] Q. Fan *et al.*, "Polyvinylidene fluoride composite nanofibrous filter for high-efficiency PM2.5 capture," *Compos. Commun.*, vol. 22, p. 100533, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.coco.2020.100533.
- [37] P. A. Corning, *Nature's Magic: Synergy in Evolution and the Fate of Humankind*, 1st ed. New York: Cambridge Univ. Press, 2003.
- [38] Y. Paz, "Application of TiO photocatalysis for air treatment: Patents' overview," *Appl. Catal. B*, vol. 99, no. 3–4, pp. 448–460, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.apcatb.2010.05.011.
- [39] H. Yoneyama and T. Torimoto, "Titanium dioxide/adsorbent hybrid photocatalysts for photodestruction of organic substances of dilute concentrations," *Catal. Today*, vol. 58, no. 2, pp. 133–140, May 2000, doi: 10.1016/S0920-5861(00)00248-0.
- [40] A. Ochoa Duarte, L. D. Cangrejo Aljure y T. Delgado, "Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire," *Rev. Cubana Cienc. Informáticas*, vol. 12, no. 1, pp. 189–204, 2018. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992018000100014





Capítulo 10

Soft sensor* de caudal soportado en inteligencia computacional

Soft Sensor Aided by Computer Intelligence

Para citar este capítulo: <https://doi.org/10.22430/9786287751415.10>

Daniel Gaviria ¹

Jean P. Morán-Zabala ²

Juan E. Urrea ³

Marcela Vallejo ⁴

Edilson Delgado-Trejos ⁵

¹ Estudiante de Tecnología en Control de la Calidad, Laboratorio AMYSOD, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0001-8074-0559, correo electrónico danielgaviria300073@correo.itm.edu.co

² Estudiante de Ingeniería de la Calidad, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-0929-248X, correo electrónico jeanmoran281289@correo.itm.edu.co

³ Estudiante de Maestría en Ingeniería Biomédica, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0003-3814-0060, Correo electrónico: juanurrea244695@correo.itm.edu.co

⁴ Docente investigadora, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Institución Universitaria ITM, 050034 Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-9724-3169, correo electrónico marcelavallejo@itm.edu.co

⁵ Profesor titular, Grupo CM&P, Laboratorio AMYSOD, Departamento de Calidad y Producción, Institución Universitaria ITM, 050034, Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-4840-478X, correo electrónico edilsondelgado@itm.edu.co

Resumen. La medición de caudal involucra el problema de que los sensores son caros, intrusivos y no transportables. Por esto, en la literatura se ha propuesto el diseño de soft sensores basados en la existencia de una relación fenomenológica entre las características vibratorias que se producen en la pared de la tubería y el caudal que circula por ella. Sin embargo, el modelado de esta relación presenta desafíos importantes, asociados a parámetros como el rango de caudal por medir y el diámetro y material de las tuberías. En este trabajo, se propone el uso de técnicas de análisis multirresolución como la descomposición empírica de modos (EMD) y la descomposición por vibraciones de Hilbert (HVD) para lograr un espacio de representación efectivo, en orden de un sistema de inferencia preciso y robusto. Para el proceso de inferencia se usaron las técnicas basadas en regresión *spline* y regresión por vectores de soporte (SVR). Los resultados demuestran mayor consistencia en cuanto a precisión y robustez en caudales altos, mientras que las vibraciones para caudales bajos son más propensas al embebimiento de otras dinámicas.

Palabras clave: características de representación, inferencia, medición de caudal, momentos estadísticos, regresión, *soft sensor*.

** Este capítulo es un producto del proyecto de investigación financiado por la Institución Universitaria ITM y la Agencia de Educación Postsecundaria de Medellín (SAPIENCIA) con el código P20234 titulado "Clasificador automático para determinar periodos de confirmación metrológica en un sistema de medición utilizando técnicas de inteligencia artificial. Caso de estudio: medición de nivel en fluidos". En este proyecto participó el semillero Metrología Científica del Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción, dentro de las actividades científicas del Laboratorio Análisis de Medición y Soporte de Decisión (AMYSOD) de Parque i.*

Introducción



El caudal es una variable comúnmente usada en los procesos industriales, pero muy difícil de medir [1] y de alta demanda tanto instrumental como operativa, debido a lo intrusivo de su instalación, además de lo costoso que resulta detener el proceso productivo cada vez que el sensor necesita ser calibrado o ajustado si se quiere asegurar un proceso de medición con alta precisión. La instalación de los sensores convencionales de caudal requiere romper la tubería, ubicar el dispositivo y volver a resanar la estructura; esto convierte cada sensor en un instrumento de medida costoso y no transportable, necesitándose la instalación de un número elevado de estos en todo el proceso productivo.

Además, esta variable puede llegar a ser no observable ante una medición directa cuando el proceso está en condiciones adversas. Por esta razón, se han desarrollado investigaciones para el desarrollo de sistemas de medición de caudal transportables, de bajo costo, fácil instalación y no intrusivos, basados en métodos de medición indirecta, espacios de representación e inteligencia computacional, dando origen a los soft sensores [2].

La literatura sobre soft sensores para la medición de caudal muestra gran potencial, dadas las bondades que ofrecen los procesos de inferencia basados en espacios de representación, entrenamiento de las máquinas de aprendizaje o rutinas de aprendizaje profundo, cuando se toman como datos de entrada las señales de vibración adquiridas en las paredes de la tubería [3]. Sin embargo, los resultados han mostrado dificultades para alcanzar precisiones altas en valores de caudal bajos, además de una alta dependencia de los resultados a factores como el material y diámetro de la tubería y la ubicación del sensor. De este modo, aunque se ha comprobado el potencial del análisis de vibraciones para la inferencia de caudal, aún no se ha llegado a desarrollos comerciales o de amplio uso [4].

En este capítulo, se discute y se hacen pruebas experimentales que involucran el análisis de vibración y la descomposición de señales para el desarrollo de un soft sensor de caudal soportado en inteligencia computacional. Se utiliza un acelerómetro triaxial para capturar la dinámica vibracional de la tubería y se discute sobre el desempeño de la descomposición de modo empírico (EMD) y la descomposición de vibración de Hilbert-Huang (HVD) para generar un espacio de representación efectivo que logre capturar la dinámica del proceso. Lo anterior permite un proceso de inferencia más robusto, el cual se propone mediante regresión *spline* y regresión por vectores de soporte (SVR), de manera

que se puede concluir sobre la solución propuesta en términos de robustez, transportabilidad y bajo costo para la medición no invasiva de caudal.

10.2 Preliminares teóricos

10.2.1 La medición de caudal y su relación vibratoria con la tubería

La medida de caudal consiste en la determinación de masa o volumen que circula por una tubería por unidad de tiempo. Existen diversos tipos de instrumentos convencionales para medir caudal, entre los que se encuentran los rotámetros, caudalímetros de turbina y caudalímetros de presión diferencial. Estos últimos son los más utilizados y basan su funcionamiento en obligar al flujo de líquido a pasar por una sección de tubería cuyo diámetro es menor al resto de los conductos.

El principio de medición de los instrumentos de medición diferencial se basa en la ecuación de Bernoulli, la cual permite relacionar la proporción de la presión diferencial con la velocidad del flujo, y fenomenológicamente se puede relacionar con la cantidad de flujo si se tienen las características geométricas del ducto [5]. Los medidores basados en el principio de Bernoulli brindan muy buenos niveles de precisión, pero implica siempre intervenir la tubería para instalar el medidor, puesto que los sensores son intrusivos. Una alternativa para garantizar la confiabilidad de las mediciones consiste en la aplicación de soft sensores, que permitan una medición indirecta, usando sensores no intrusivos que puedan acoplarse a las paredes de la tubería y medir las características de las vibraciones que se producen en ella al fluir el líquido.

La literatura ha probado que la información extraída de las vibraciones puede correlacionarse con el valor del caudal. En efecto, la aceleración inercial de la tubería en dirección radial se correlaciona con el caudal (\dot{Q}) a modo de una serie de relaciones lineales (α), según como se expresa en la ecuación (1) [3], [4]:

$$\dot{Q} = A\bar{U} \alpha u' \alpha \tau_w \alpha \frac{\partial^2 r_w}{\partial t^2} \quad (1)$$

donde $(\frac{\partial^2 r_w}{\partial t^2})$ es la aceleración en la dirección radial, A es el área transversal de la tubería, \bar{U} es la velocidad promedio del flujo, u' son las fluctuaciones de velocidad en el eje axial y τ_w es la tensión tangencial en la tubería. En el mismo sentido de relacionar el caudal $f(t)$ con la vibración adquirida en la pared de la tubería $v(t)$, también se ha reportado una relación analítica en forma de una función de raíz de tercer orden, como se expresa en la ecuación (2) [6]:

$$f(t) = a \sqrt[3]{v(t)} + \beta \sqrt{v(t)} + \gamma v(t) + \delta \quad (2)$$

donde a, β, γ y δ son parámetros de la función asociados a la geometría de la tubería y deben ajustarse según sea el caso de estudio. Las relaciones expresadas en (1) y (2) han fomentado la exploración de la dinámica vibratoria de la tubería en relación con el caudal, a modo de base funcional de un soft sensor.

Aunque la dependencia entre caudal y vibración ya ha sido estudiada en la literatura, no hay una ecuación determinística planteada y los diferentes artículos reportan el modelado de esta relación mediante técnicas de procesamiento de datos como las redes neuronales artificiales (RNA) [7], [8], [9], [10]; la regresión lineal múltiple (MLR) [11], [12], [9], [13]; la regresión por componentes principales (PCR) [9], [14]; la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) [15], [16], [17], [10], [18]; la regresión Ridge (RR) [77]; el operador de selección y contracción mínima absoluta (LASSO) [12], [19] y la regresión por procesos gaussianos (GPR) [12], [10].

Estos trabajos reportados en la literatura difieren en cuanto al rango de caudales estudiados, reportando mayores dificultades con los valores de caudal bajo y registrando la influencia de una serie de factores sobre el modelo, como son tanto el material y diámetro de la tubería como la localización de los sensores. Este tipo de dificultades lleva a la necesidad de explorar mejores formas para el procesamiento de los datos de vibración a fin de lograr resultados de inferencia satisfactorios.

10.2.2 Procesamiento de los datos de vibración

El procesamiento de los datos se puede dividir en varias partes: una adecuación de los datos mediante estandarización y detección de valores anómalos o atípicos, la comprensión de la naturaleza de los datos usando momentos estadísticos y la generación de características representativas, descomponiendo las señales de vibración mediante análisis multiresolución, para posteriormente construir un espacio de representación efectiva que alimente un mecanismo de regresión tomado como estrategia de inferencia de la medición.

- **Adecuación de los datos.** Las señales capturadas por un sistema de adquisición siempre son susceptibles de presentar datos anómalos o atípicos. Los datos anómalos son aquellos ausentes por falla en los sensores, o que se salen del formato esperado y, al no aportar información, deben reemplazarse por valores con mayor probabilidad estadística según la distribución del resto de los datos. Los datos atípicos (también conocidos como *outliers*) son aquellos puntos que presentan una desviación importante e inesperada del resto de las observaciones y suelen obedecer a interferencias, artefactos o componentes de ruido aditivo en los sensores. La detección y la corrección adecuadas de datos atípicos juegan un papel importante en el

procesamiento de la información, puesto que pueden distorsionar los resultados, al no corresponder a la dinámica real del sistema que se está modelando [20].

Existen diversas alternativas para la identificación de datos atípicos mediante la aplicación de estadísticas no paramétricas [21]. Aunque se reportan muchas técnicas, uno de los procedimientos más usados se basa en la estandarización de la variable objeto de estudio, en la que se considera *outlier* a aquel dato cuyo valor estandarizado supera los límites establecidos para dicho proceso. La literatura recomienda usar el límite en términos de desviaciones típicas, por ejemplo, para muestras pequeñas (menores a 80 datos) y para muestras de tamaño más grande. Otra alternativa es usar la prueba de Grubbs [22] que parte de la hipótesis de que no hay valores atípicos en una muestra de N datos, calculando el estadístico G según la ecuación (3), donde x_i es la observación i , \bar{x} es la media y σ es la desviación típica, para lo cual es necesario rechazar la hipótesis si no se cumple un nivel de significancia establecido según sea el caso de estudio.

$$G = \frac{\max_{i=1, \dots, N} |x_i - \bar{x}|}{\sigma} \quad (3)$$

Para la corrección de *outliers*, se ha sugerido remplazarlos con la media de los datos remanentes; sin embargo, este procedimiento tiende a reducir la dispersión de la población [23]. Se han propuesto técnicas mucho más elaboradas basadas en múltiples imputaciones, como los presentados en [24] y [25].

- **Momentos estadísticos.** Las vibraciones en una tubería se capturan a modo de series temporales de aceleración y para analizar este tipo de señales es recomendable usar parámetros como los momentos estadísticos, con los cuales se busca comprender la dinámica estructural de las series de tiempo y, en

algunos casos, pueden llegar a ser usados como características de representación, si es que contribuyen a la discriminación en el entrenamiento del modelo. Los primeros cuatro momentos estadísticos son la media, la varianza, la asimetría y la curtosis, los cuales, generalmente, se centran en la media (momentos centrados) y se estiman según la ecuación (4) para $k=1,\dots,4$, siempre que exista dicha esperanza [26].

$$\mu_k = E[(X-E[X])^k] \quad (4)$$

◇ **Media:** está dada por la suma y la división sobre el número total de valores del conjunto de datos. Puede estar expresada tanto para una población de N datos x_i como para una muestra de n datos x_i .

◇ **Varianza:** representa la variabilidad de una serie de tiempo respecto a su media \bar{x} . Esta se calcula mediante la suma de los residuos al cuadrado entre el total de observaciones x_i ; esto es, $1/N \sum_i (x_i - \bar{x})^2$

◇ **Asimetría:** permite calcular la asimetría de una distribución con el fin de determinar si es asimétrica positiva (la distribución tiene mayor número de valores a la derecha de la media), negativa (la distribución tiene mayor número de valores a la izquierda de la media) o simétrica (la distribución tiende a un mismo número de valores tanto a la izquierda como a la derecha de la media). Generalmente, se utilizan tres tipos de coeficientes de asimetría, según el caso: el coeficiente de Fisher, el coeficiente de Pearson y el coeficiente de Bowley [26].

◇ **Curtosis:** según las concepciones recientes [27], este momento estadístico ofrece información en cuanto a frecuencias/probabilidad que la variable estadística/aleatoria tiene sobre todo en las colas y la existencia de valores que se salen de la regularidad de la mayoría de las observaciones, de manera que queda descartada la relación de este índice con el

centro de la distribución y su apuntamiento, lo cual hacía parte de su descripción tradicional. Estadísticamente, la curtosis y la asimetría son dos conceptos que suelen ser estudiados en paralelo, dado que ambos sirven para analizar la estructura de los datos respecto a su distribución.

- **Características de representación.** En la literatura, se reportan usualmente investigaciones que proponen la desviación estándar de las señales de vibración o de la serie temporal promedio en el dominio de la frecuencia como una característica de representación relevante, mientras otros proponen el uso del valor RMS (Root Mean Square) de la señal [28]. En todo caso, una vez que se ha establecido el conjunto de características, estas son ingresadas como entrada a un algoritmo de inferencia que permita estimar el valor del caudal por medio de técnicas de procesamiento inteligente. En este punto se han analizado tanto modelos simples lineales [29], [1], [30], [31] como modelos polinómicos [32], [33], [34] y regresión por partes [35], [36]. En investigaciones recientes, se ha incrementado el uso de inteligencia computacional con redes neuronales artificiales [37], [38].

Con el análisis de momentos estadísticos, se puede evidenciar que las señales de vibración manifiestan variaciones en sus momentos durante el progreso en el tiempo, lo cual conduce a que las rutinas de procesamiento para este tipo de datos temporales deben suponer comportamiento no estacionario.

Por lo anterior, el análisis de momentos estadísticos permite obtener información importante, pero es insuficiente por sí solo para generar un espacio de representación efectivo con miras a procesos de inferencia robustos, dada la restricción de no estacionariedad. En este sentido, las técnicas de descom-

posición de señales son una alternativa para considerar si se quiere obtener un conjunto de características relevante, que permita un mejor desempeño de los algoritmos de inferencia. A continuación, se describen las técnicas de descomposición usadas en el presente trabajo.

- **Descomposición de señales mediante análisis multirresolución.** El análisis multirresolución parte del supuesto de que una señal o serie de tiempo siempre será el resultado de la suma finita (o infinita, dependiendo de la base matemática) de otras señales componentes, las cuales pueden corresponder al escalamiento y resolución de una base ortonormal (e.g., *wavelets*) [39], o simplemente a la suma de señales que se supone fueron mezcladas en algún momento dentro del mismo proceso fenomenológico (e.g., un electrocardiograma) o por un sensor de captura artificial (e.g., un micrófono) [40]. En este trabajo se propone el uso de descomposición de señales mediante descomposición empírica de modos (EMD) y descomposición por vibraciones de Hilbert (HVD).
- **Descomposición empírica de modos (EMD).** El método EMD se desarrolla a partir de la suposición de que cualquier serie temporal no estacionaria consta de diversos modos intrínsecos simples de oscilación en un ámbito local, permitiendo la separación en componentes de la escala temporal en subseñales llamadas funciones de modo intrínsecas (IMF), las cuales se convierten en representaciones subyacentes de la señal original. En efecto, EMD descompone una señal $x(t)$ (siguiendo la notación de la ecuación 5) en IMF con la restricción de que los mínimos y máximos locales difieren, al menos, en uno y cada IMF debe tener un valor medio de cero [41]. Así, la descomposición de $x(t)$ se logra en varios $h_n(t)$ y un residuo $r(t)$, según la expresión:

$$x(t) = \sum_n h_n(t) + r(t) \quad (5)$$

donde $r(t)$ es una función de variación lenta con media cero y, en orden de garantizar la expresión (5), es necesario seguir los pasos listados a continuación:

1. Inicializar $n=0$ y $r_0(t)=x(t)$
2. Extraer el n -ésimo IMF $h_n(t)$, así:
 - a) Establecer $h_0(t)=r_{n-1}(t)$ y un contador $k=1$
 - b) Identificar todos los mínimos y máximos locales de $h_{k-1}(t)$
 - c) Construir $h_k(t)$ mediante la interpolación de *spline* cúbicos la envolvente $U_{k-1}(t)$ dada por el máximo y la envolvente de $L_{k-1}(t)$ dada por el mínimo.
 - d) Determinar la media $m_{k-1}(t) = \frac{1}{2} U_{k-1}(t) - L_{k-1}(t)$ a partir de b) para el k -ésimo componente de

$$h_{k-1}(t) := h_{k-1}(t) - m_{k-1}(t)$$

⇒ Si $h_k(t)$ no se ajusta a todos los criterios de los IMF, entonces $k \rightarrow k+1$ y se debe repetir el proceso desde el paso b).

⇒ Si $r_n(t)$ representa un residuo, se debe detener el proceso; de lo contrario $n \rightarrow n+1$ e iniciar de nuevo en 2.

Los componentes IMF logrados mediante la descomposición por EMD se clasifican en términos de frecuencia [42]. Un avance potencial de EMD consiste en descomponer la señal mediante la extracción directa de la energía local asociada con las escalas de tiempo intrínsecas, haciéndola altamente adaptable y, en consecuencia, obtener mejor la representación de las características tiempo-frecuencia de la señal [43].

La frecuencia instantánea y la amplitud de cada función de modo intrínseco se derivan de la creación de la señal analítica, también denominada compleja, partiendo de la señal original [43].

Por su parte, la adición de ruido blanco gaussiano en EMD reduce el problema que tiene esta técnica respecto a la mezcla de modos al poblar de manera completa el espacio tiempo-frecuencia, aprovechando el comportamiento que se genera a modo de banco de filtros [44].

También se ha demostrado que derivaciones de esta técnica, como el EMD de Ensamble (EEMD) [45], poseen mejores capacidades de descomposición según las particularidades que tenga la señal por sus localidades [46].

- **Descomposición por vibraciones de Hilbert (HVD).** La técnica HVD combina la descomposición EMD con la transformada de Hilbert-Huang, donde es necesario asumir que la señal original es una suma de cuasiarmónicos, que las envolventes de cada armónico difieren y que los datos originales son más largos que el componente más lento de la señal original [47]. La transformada de Hilbert-Huang es un método de análisis adaptativo de tiempo-frecuencia que mejora la resolución obtenida con EMD, a fin de capturar rasgos característicos locales de las señales no estacionarias [48], [49].

HVD se fundamenta en la estimación de la amplitud y la frecuencia instantáneas (FI) de cada IMF para establecer la distribución del espectro de energía-tiempo-frecuencia Hilbert-Huang [50] y, de esta manera, no implica ajustes ni algoritmos empíricos, ya que descompone la señal inicial $x(t)$ en una suma de componentes con amplitudes y frecuencias instantáneas de variación lenta. La identificación de cada componente pertenece a diferentes escalas de tiempo y se basa en el análisis de

dominio de tiempo global de la FI obtenida de la señal inicial [51]. Los componentes de la señal inicial normalmente corresponden a armónicos cuyas amplitudes son diferentes entre sí [47]. Los pasos para la descomposición del método HVD, suponiendo que $a_1(t)$ es mayor que $a_2(t)$, son:

$$x(t) = a_1(t) e^{j \int_0^t \omega_1(t) dt} + a_2(t) e^{j \int_0^t \omega_2(t) dt} \quad (6)$$

La FI de $x(t)$ puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\omega(t) = \omega_1 + \frac{(\omega_2 - \omega_1)[a_2^2(t) + 2a_1(t)a_2(t) \cos(\int (\omega_2 - \omega_1) dt)]}{a_1^2(t)} \quad (7)$$

donde se observa que $\omega(t)$ se divide en dos partes, una frecuencia de alteración gradual del primer componente ω_1 y un componente oscilante asimétrico que cambia rápidamente en función de la frecuencia ω_2 [47].

En general, $x(t)$ contiene más de dos componentes y la expresión para FI puede llegar a ser mucho más compleja. Sin embargo, aún se puede extraer la FI del componente de amplitud máxima mediante filtrado de paso bajo, obteniendo la envolvente correspondiente del componente más grande [41], [47]. De esta forma, HVD descompone ondas complejas al distribuir las en componentes similares, convirtiéndolas así en ondas de alta frecuencia. Si la frecuencia del componente principal es menor que la frecuencia de corte del filtro de paso bajo, HVD percibe esa forma de onda lenta como un solo componente de desplazamiento variable [51].

Estas metodologías son útiles para la descomposición de señales con variación entre grandes magnitudes, por lo que se reduce el costo computacional [52]. Adicionalmente, se ha encontrado que HVD es un método más poderoso que la Transformada Wavelet (WT) para procesos no estacionarios, puesto que es adaptativo y tiene una mejor resolución tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia [53].

- **Espacio de representación efectiva.** Después de encontrar operadores que ayuden a establecer un conjunto de características de representación con capacidad para capturar la dinámica fenomenológica que se requiere para inferir una medición en términos de la dinámica representada por esas características, es indispensable seleccionar solamente aquellas que tienen mayor capacidad de representación (i.e., espacio de representación efectiva), pues, en la construcción de soft sensores, la calidad de la representación se asocia con la precisión, el error y la incertidumbre, con la restricción de involucrar el mínimo número de variables con máxima relevancia de representación. De esta manera, se busca minimizar el costo computacional mientras se maximiza la calidad del aprendizaje de las máquinas de cómputo. Para una mejor comprensión de este tema, en cuanto a conceptos, técnicas y aplicaciones, se recomiendan los reportes publicados en [54] y [55].
- **Inferencia de la medición.** Una vez constituido un espacio de representación efectiva, se requiere realizar un proceso de inferencia de la medición en el cual, a partir de las características de representación extraídas de las señales de vibración, se pueda construir un hiperespacio de regresión que posibilite la estimación del valor del caudal específico que está pasando por la tubería. En este sentido, existe una diversidad de algoritmos que permiten hacer regresión, ya sea con operadores lineales o no lineales. Para las pruebas experimentales del presente trabajo, se eligieron dos estrategias de regresión bien conocidas en la literatura, como son regresión *spline* y regresión por vectores de soporte (SVR), por la capacidad que tiene cada una para adaptarse a dinámicas con no linealidades fuertes en diferentes rangos de la variable por medir.

Regresión spline

La regresión es uno de los instrumentos más usados en la estadística aplicada, ya que es un método efectivo para el tratamiento de datos inciertos e imprecisos, pero que tienden a un valor de verdad [56]. Se tiene un enfoque tradicional basado en los métodos paramétricos para la construcción de modelos y un enfoque no paramétrico donde los métodos no requieren de un conocimiento de la estructura del modelo, siendo la regresión *spline* uno de los no paramétricos más conocidos, dividiendo el conjunto de datos en intervalos o puntos denominados nodos [57].

El algoritmo que utiliza la regresión *spline* se basa en la interpolación de superficies $S_{(x,y)}$, según se expresa en la ecuación (8), donde $T(x,y)$ es un parámetro de «tensión» que permite atraer el interpolante hacia la polilínea que conecta el punto (x,y) con los puntos de entrada; $j=1,2,3,\dots,N$ siendo N la cantidad total de puntos de la serie de tiempo; λ_j son los coeficientes determinados por la solución de un sistema de ecuaciones lineales; r_j es la distancia entre el punto (x,y) y el punto j ; y $R(r_j)$ es una circunferencia de radio r_j en la que se toman los puntos que quedan dentro para la regresión.

$$S_{(x,y)} = T(x,y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (8)$$

Las funciones *spline* suministran una base flexible para modelar relaciones con predictores continuos. Aunque, es importante poseer un enfoque de inicialización para la selección del modelo y la estimación de las funciones con el fin de limitar la inestabilidad y proporcionar modelos de regresión sensibles en el entorno multivariante [58]. Pruebas experimentales en múltiples conjuntos de datos y aplicaciones en imágenes interactivas por medio de regresión *spline* evidencian su capacidad de interpolar puntos de datos dispersos con alta precisión a fin de obtener evaluaciones

locales óptimas [59], [60]. Trabajos en el área de la salud también demuestran bondades importantes a la hora de identificar puntos de corte relevantes en series de datos [61]. Adicionalmente, en áreas numéricas de alta complejidad, se ha podido lograr la disminución notable de la variabilidad del proceso de convergencia hacia un valor preciso o predecible [62], [63].

Regresión por vectores de soporte (SVR)

La SVR puede ser empleada tanto en regresiones lineales como no lineales; en todo caso, se requieren conjuntos de datos de entrenamiento que cubran el dominio de interés acompañados por las soluciones en ese dominio. Es importante destacar que en los métodos de regresión convencional se busca minimizar el error en todo el conjunto de entrenamiento, mientras que para SVR se define una zona en torno a un hiperplano llamado margen, donde se ignoran los errores, pero se buscan las mejores aproximaciones al valor dentro de ese margen y, de esta manera, se buscan encajar tantas instancias como sea posible entre las líneas, mientras se limitan las violaciones de los márgenes [64].

El interés de SVR se centra en aproximar la función que se usaría para generar el conjunto de datos de entrenamiento, donde se incluye el uso de un *kernel*, el cual se constituye en el núcleo de un espacio dimensional donde se cumplen necesidades requeridas para dar soluciones en el dominio y también hay que ajustar la cantidad de vectores de soporte y el control de variación del margen, en concordancia con un parámetro de regularización. En general, la regresión por vectores de soporte busca minimizar la expresión (9).

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{j=1}^n (\xi_j + \xi_j^*) \right\} \quad (9)$$

donde w es la magnitud del vector o hiperplano, c es una constante mayor a 0 que determina el equilibrio entre la regularidad de la función y la cuantía hasta la cual se toleran las desviaciones mayores a las bandas de soporte, ξ_i y ξ_i^* son las variables que controlan el error cometido por la función de regresión en la aproximación a las bandas y n es el número de datos de entrenamiento.

Para un valor de c grande, se consideraría que el conjunto está perfectamente representado por el hiperplano predictor, por lo que ξ tendería a 0. En contraste, un valor de c pequeño permitirá valores grandes de ξ ; es decir, habría muchos ejemplos mal representados. Para analizar la sensibilidad de los parámetros involucrados en este proceso de regresión, es necesario evaluar la complejidad computacional para el entrenamiento y la validación, profundizando en la estructura de correlación de los errores de predicción [64], [65]. Un *kernel* muy usado en reportes de la literatura para SVR es el de base radial, por su buen desempeño en dinámicas con no linealidades fuertes y comportamiento no estacionario [66], [67].

10.3 Materiales y métodos

10.3.1 Base de datos

Las pruebas efectuadas en el presente trabajo utilizaron la base de datos descrita en [68]; específicamente, la correspondiente a un banco de micromedición diseñado para la calibración de caudalímetros ubicado en las instalaciones de Acuatubos S. A. S., una compañía en Envigado, Antioquia, Colombia. Esta compañía cuenta con un laboratorio de calibración de caudalímetros acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

Las pruebas se adelantaron con los numerales aplicables de la norma ISO 4064-1/2: 2016 y se obtuvieron datos de aceleración, en 3 ejes, en una tubería con circulación de agua fría para 61 valores de caudal comprendidos entre 6.25 L/h y 2500 L/h (véase la tabla 10.1), usando una unidad de medición inercial (IMU) BNO055. La base de datos cuenta con un total de 183 registros de una duración aproximada de 4 minutos cada uno, que corresponden a 3 repeticiones por cada caudal estudiado.

Las señales fueron muestreadas a una frecuencia de 100 Hz y cada registro corresponde a un caudal que contiene cuatro columnas: marca temporal en microsegundos, aceleración en el eje x, aceleración en el eje y y aceleración en el eje z. Para este trabajo, se realizó una conversión de los valores de caudal a números enteros de referencia, de acuerdo con la tabla 10.1, y todo el desarrollo computacional se hizo usando lenguaje Python.

Tabla 10.1. Relación de los valores de caudal con números enteros de referencia

# REF	Caudal (L/h)	# REF	Caudal (L/h)	# REF	Caudal (L/h)	# REF	Caudal (L/h)
1	6.25	17	325	33	1125	49	1925
2	8.25	18	375	34	1175	50	1975
3	10.25	19	425	35	1225	51	2025
4	12.25	20	475	36	1275	52	2075
5	14.25	21	525	37	1325	53	2125
6	16.25	22	575	38	1375	54	2175
7	18.25	23	625	39	1425	55	2225
8	20.25	24	675	40	1475	56	2275
9	22.25	25	725	41	1525	57	2325
10	24.25	26	775	42	1575	58	2375
11	25	27	825	43	1625	59	2425
12	75	28	875	44	1675	60	2475

Continúa...

# REF	Caudal (L/h)	# REF	Caudal (L/h)	# REF	Caudal (L/h)	# REF	Caudal (L/h)
13	125	29	925	45	1725	61	2500
14	175	30	975	46	1775		
15	225	31	1025	47	1825		
16	275	32	1075	48	1875		

Fuente: elaboración propia.

10.3.2 Adecuación y representación de los datos

A fin de mitigar los problemas que pueden aparecer en el procesamiento de los datos y el uso de operadores y transformaciones debidas a la escala o comportamiento comparable entre las distintas series de datos y así garantizar la efectividad de las soluciones, se realizó el proceso de normalización de los datos y eliminación de datos anómalos mediante z-score y la prueba de Grubbs.

Para comprender la naturaleza del comportamiento estacionario de los datos de vibración asociados con las repeticiones de los caudales relacionados en la tabla 10.1, se analizan los patrones y tendencias estadísticas, según el comportamiento de los primeros cuatro momentos estadísticos de las series de tiempo correspondientes a los 61 caudales de agua fría, y con la ayuda de la prueba z-score se pudiera comprender qué tanta variabilidad presenta cada uno de los momentos a lo largo del tiempo. Este análisis estadístico se convierte en una herramienta valiosa para comprender el contexto de los datos, de manera que se facilita la toma de decisiones en cuanto a las próximas etapas de procesamiento.

Para la estimación de características de representación, se consideró el comportamiento de las series de datos a lo largo del tiempo de los 4 momentos estadísticos; se evidenció un comportamiento

fuertemente no estacionario, por lo que se tomó la decisión de usar descomposición de señales mediante análisis multirresolución, a fin de estimar las características desde subcomponentes de las señales de vibración con dependencia fenomenológica de la magnitud del caudal. En este sentido, se aplicaron las técnicas HVD y EMD para descomponer las señales de vibración.

En particular, se tomaron los componentes 25 al 30 de los oscilantes asimétricos (OA) de HVD y los primeros cuatro niveles de descomposición (IMF) de EMD para cada uno de los caudales y sus repeticiones. Así, se estimaron los primeros cuatro momentos estadísticos a cada componente de señal, con el objetivo de componer el conjunto total de vectores de representación para los 61 caudales.

10.3.3 Espacio de representación efectiva y regresión

Del conjunto completo de vectores de representación, se adoptó un análisis de relevancia consistente en un esquema de valoración perceptual según modelado por regresión *spline*, con el fin de seleccionar los vectores de representación de mayor consistencia en la tendencia dinámica monótona ascendente o descendente, mientras que va aumentando el caudal. Con este proceso, se logró un conjunto menor de vectores con mayor capacidad de representación para la inferencia de caudal desde superficies de regresión.

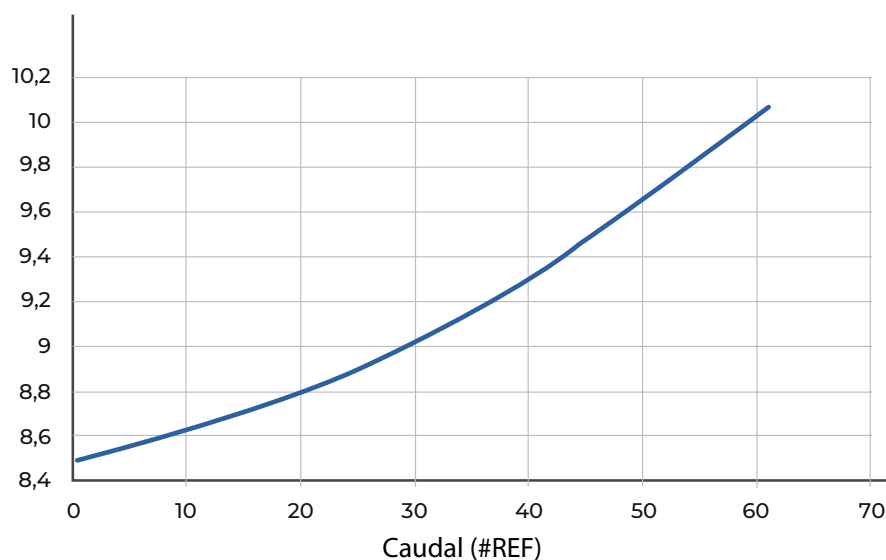
A partir del espacio de representación efectiva, se toma el 66.7 % de los datos para entrenar y conformar una superficie de regresión, mediante la minimización del riesgo de un SVR; para obtener los resultados de error de predicción en términos de error cuadrático medio (RMSE) en la inferencia de caudal, se usó el 33.3 % de los datos no conocidos por los algoritmos de entrenamiento.

10.4 Resultados y discusión

El espacio de representación efectiva quedó conformado por el tercer momento estadístico (asimetría) de los oscilantes asimétricos (OA) 28 y 29 de HVD y la varianza de los primeros tres IMF de EMD. En la figura 10.1, se muestra el comportamiento de cada una de las características relevantes, después de la regresión spline, con lo cual se observa una tendencia monótona creciente para los 61 caudales o algunas veces decreciente y creciente por segmentos.

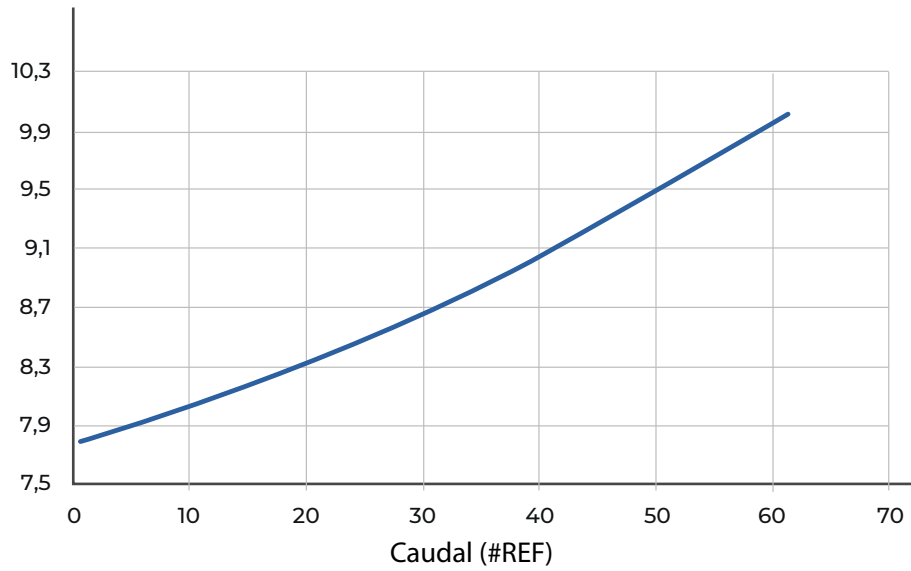
Figura 10.1. Características de representación y sus tendencias con relación a la referencia de caudal

Asimetría de HVD-OA_28

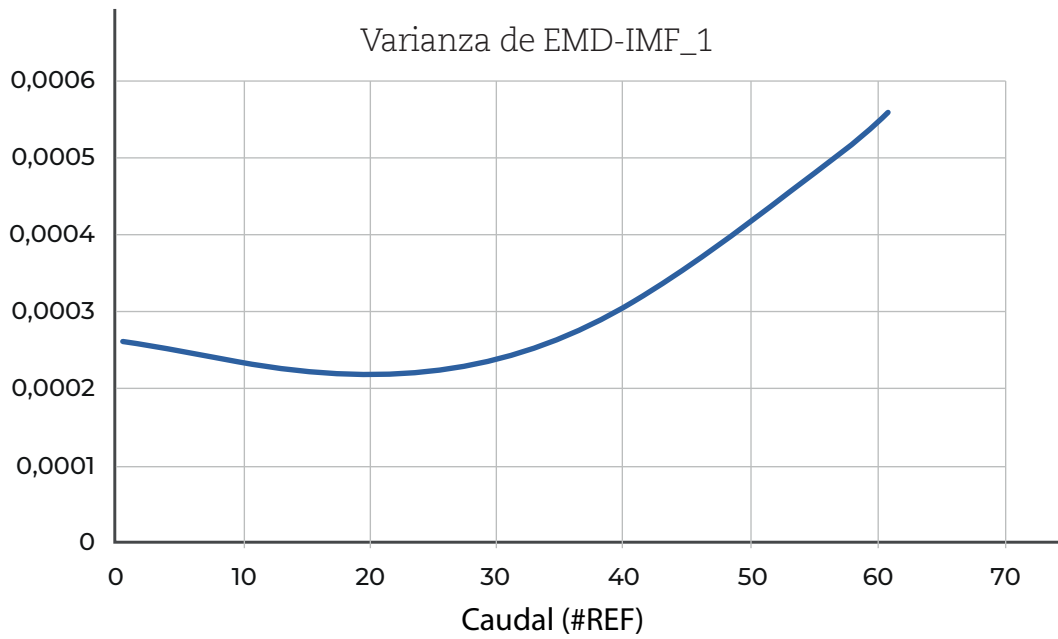


(a)

Asimetría de HVD-OA_29

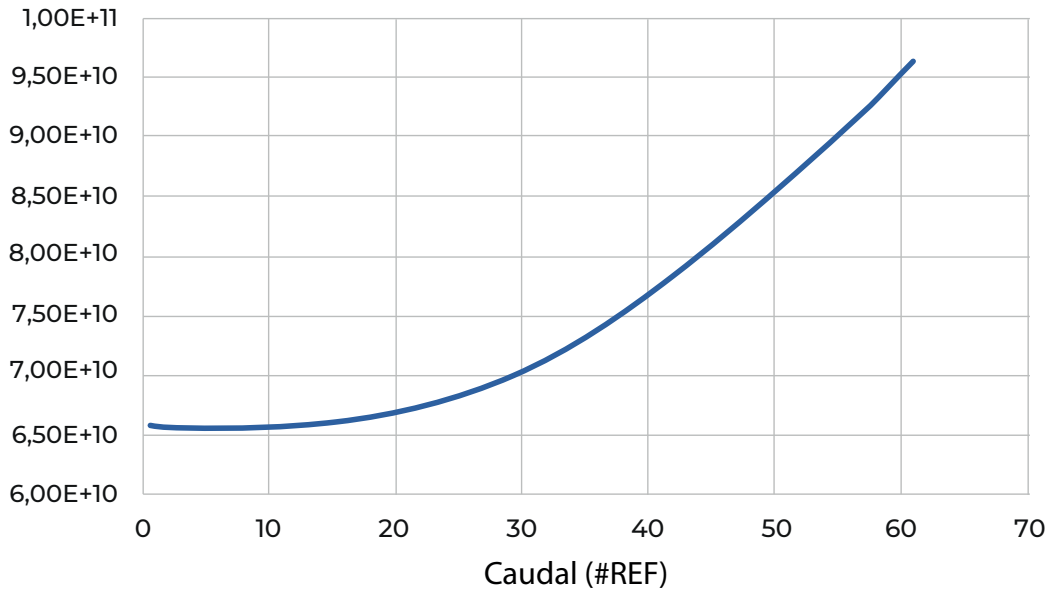


(b)



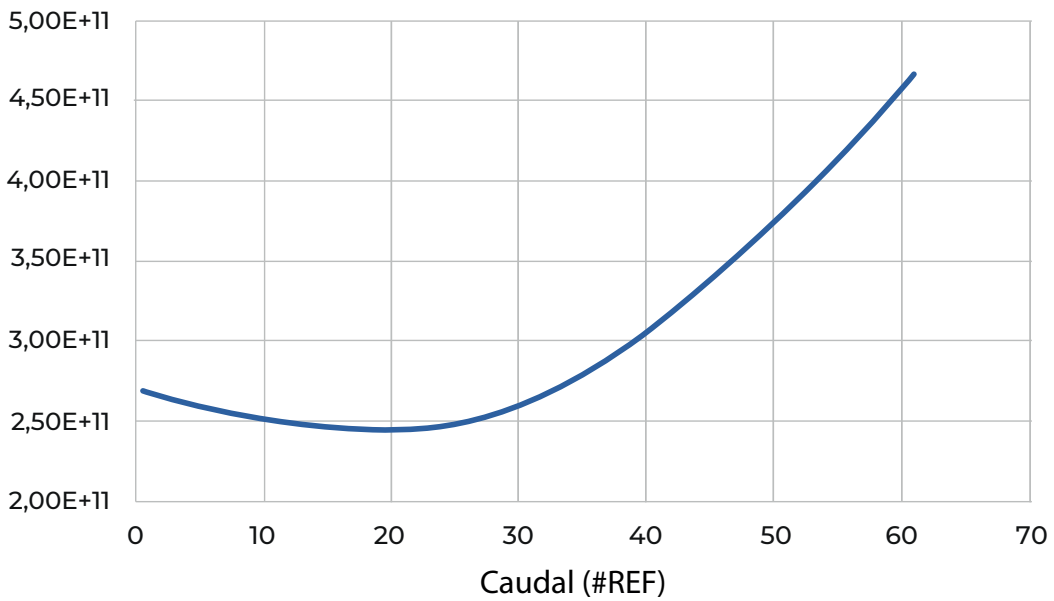
(c)

Varianza de EMD-IMF_2



(d)

Varianza de EMD-IMF_3

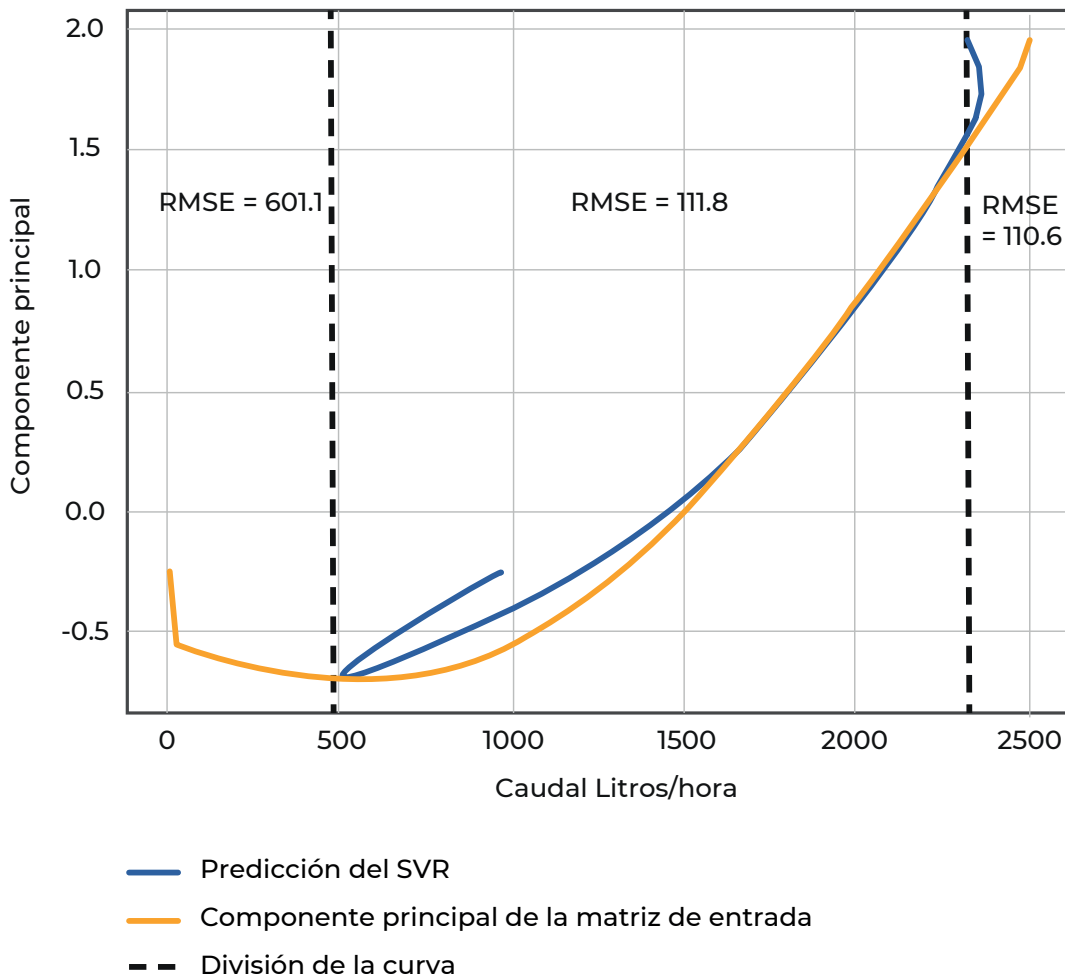


(e)

Fuente: elaboración propia.

Vale la pena notar que el eje horizontal de las imágenes de la figura 10.1 corresponde a las referencias relacionadas con los 61 caudales en L/h según la tabla 10.1. Los cinco vectores de representación fueron estimados para cada caudal y sus repeticiones, con el objetivo de lograr el espacio de entrenamiento con el que se construyó la superficie de regresión, la cual fue usada en el proceso de validación del SVR, donde se obtuvieron los errores de predicción en términos de RMSE. En la figura 10.2, se muestran los resultados de predicción del SVR.

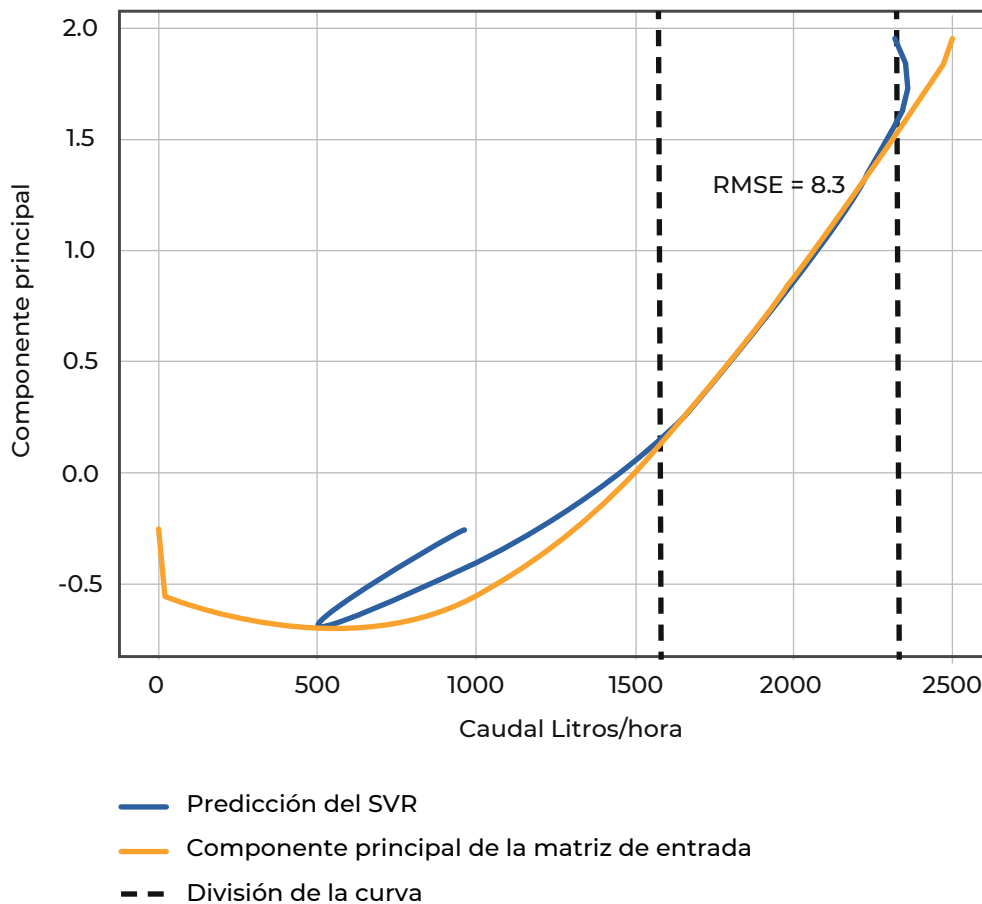
Figura 10.2. Resultados de predicción del SVR para la inferencia de caudal en L/h



Fuente: elaboración propia.

Para la construcción de la figura 10.2, se relacionaron las entradas para la validación del SVR contra la salida de predicción obtenida desde la superficie de regresión. Dado que las entradas corresponden a puntos 5-dimensionales (un punto por caudal y una dimensión por característica), las 5 características tomadas como relevantes para la inferencia de caudal se normalizaron y con la técnica de análisis de componentes principales (PCA) [54] se graficó el componente principal, al ser la dimensión que captura la variabilidad representativa de todos los puntos 5-dimensionales. En la figura 10.3, se resalta el intervalo en el que se obtiene el mejor resultado de predicción para la inferencia de caudal.

Figura 10.3. Intervalo de mejor inferencia de caudal en L/h



Fuente: elaboración propia.

De la figura 10.3 se observa que, para caudales entre 1525 L/h y 2325 L/h, esta técnica basada en el análisis de vibraciones ofrece una medición de caudal con un error cuadrático medio de 8.3 L/h y una desviación estándar de 3.3 L/h, lo cual corresponderá a un error de medición máximo del 0.5 % si se usa este procedimiento en un soft sensor para el intervalo indicado.

10.5 Conclusiones

En este trabajo se comprobó la relación que existe entre la magnitud de caudal que pasa por una tubería y la vibración que se percibe en su pared externa. Se establecieron procedimientos de estandarización y detección de *outliers*, a fin de adecuar el conjunto de datos; se aplicaron los primeros 4 momentos estadísticos para comprender la naturaleza estacionaria.

Se escogió el análisis multirresolución mediante descomposición de señales, usando EMD y HVD, para la estimación de vectores característicos sobre componentes que capturaran de mejor manera la dinámica asociada con el nivel de caudal; se incluyó un análisis de relevancia por conformar el espacio de representación efectivo con las características más discriminantes y un proceso de inferencia de medición integrado por una regresión spline que alimenta las entradas de un SVR en la etapa final de predicción del valor específico de caudal.

Los resultados experimentales mostraron la posibilidad de estimar el nivel de caudal a partir de las señales de vibración adquiridas desde la pared de la tubería y de usar el mecanismo propuesto en este trabajo para la creación de un soft sensor que, para caudales entre 1525 L/h y 2325 L/h, ofrece resultados dentro de lo aceptable en medidores en esta escala de magnitud, con la ventaja de que no es intrusivo, es transportable y de bajo costo.

Se pudo observar que, en la construcción del espacio de representación efectivo, se incluyeron las dinámicas monótonas crecientes derivadas de las componentes asociadas a oscilatorios asimétricos de HVD, las cuales para los 61 niveles de caudal ofrecieron una discriminación muy bien establecida, con lo que se podría deducir que solamente con estos vectores de representación podría obtenerse la precisión suficiente en la inferencia de caudal; sin embargo, los componentes relevantes de EMD incrementaron la robustez en el proceso de regresión, puesto que los IMF contienen estructuras de la dinámica interactuante, considerando en el entrenamiento esos valores que se salen de la dinámica previsible, pero que corresponden a los modos no lineales y estados intrínsecos de la medición.

Se demuestra que la combinación de la inteligencia computacional con los sensores de vibración se convierte en una integración prometedora para la creación de soft sensores de caudal, lo cual debe incluir el aseguramiento de la medición mediante la aplicación de la soft metrología. También, se identifica la necesidad de incrementar la precisión y robustez en caudales bajos, donde las vibraciones tienden a ser más propensas al embebimiento de otras dinámicas interactuantes, mediante la adopción de nuevos enfoques de aprendizaje profundo con colecciones de señales más numerosas para cada caudal, lo cual se deja como trabajo futuro si lo que se quiere es lograr un soft sensor de utilidad industrial. En efecto, un soft sensor preciso y robusto con amplio margen de medición de caudal sería una herramienta muy útil para las calibraciones de rutina en un proceso industrial, pues no habría que sacrificar pérdidas debidas a la necesidad de parar procesos, sino que se permitiría que la línea de producción pudiera permanecer continuamente activa.

Agradecimientos

Este documento se logró como parte de un trabajo de grado de Tecnología en Control de la Calidad en la modalidad procesos de investigación en el Semillero Metrología Científica del Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción, dentro del Laboratorio Análisis de Medición y Soporte de Decisión (AMYSOD) de la Institución Universitaria ITM de Medellín.

Declaración de conflicto de intereses

En aras de la transparencia, se declara por parte de los investigadores y participantes del proyecto, no presentar ningún conflicto que involucrara los intereses en la realización del proyecto, durante o después de este, de índoles comercial, contractual, o relacionado con su filiación.

Declaración de aspectos bioéticos

Según la Resolución 008430 de 1993 por el Ministerio de Salud, la presente investigación no presentó riesgos de ningún tipo (biológico, ambiental o ético) que pudiera afectar los derechos y el bienestar físico y moral de participantes o investigadores del proyecto, el entorno o la sociedad ni al medioambiente. Se informa que en ningún momento de la investigación se realizaron pruebas en humanos o animales y en ninguna etapa o actividad se contempló la interacción con pacientes, ni la manipulación de información confidencial, puesto que los procedimientos fueron de tipo computacional sobre bases de datos especializadas y, por ende, no se estima necesario el aval de un comité de ética.

Referencias

- [1] M. M. Campagna, G. Dinardo, L. Fabbiano, and G. Vacca, "Fluid flow measurements by means of vibration monitoring," *Meas Sci Technol*, vol. 26, no. 11, p. 115306, 2015, doi: 10.1088/0957-0233/26/11/115306.
- [2] M. Vallejo-Valencia, F. L. Villa-Restrepo, C. Sánchez-González, and E. Delgado-Trejos, "Metrological Advantages of Applying Vibration Analysis to Pipelines: A Review," *Scientia et Technica*, vol. 26, no. 1, pp. 28–35, 2021, doi: 10.22517/23447214.24351.
- [3] G. Dinardo, L. Fabbiano, G. Vacca, and A. Lay-Ekuakille, "Vibrational signal processing for characterization of fluid flows in pipes," *Measurement*, vol. 113, pp. 196–204, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.040>.
- [4] C. K. Batchelor and G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge university press, 2000.
- [5] Y. Kim, T. Schmid, Z. M. Charbiwala, J. Friedman, and M. B. Srivastava, "NAWMS: Nonintrusive Autonomous Water Monitoring System," in *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems - SenSys '08*, New York, New York, USA: ACM Press, 2008, p. 309. doi: 10.1145/1460412.1460443.
- [6] F. A. A. Souza, R. Araújo, and J. Mendes, "Review of soft sensor methods for regression applications," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 152, no. 2016, pp. 69–79, 2016, doi: 10.1016/j.chemolab.2015.12.011.
- [7] L. Fortuna, S. Graziani, and M. G. Xibilia, "Comparison of Soft-Sensor Design Methods for Industrial Plants Using Small Data Sets," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 58, no. 8, pp. 2444–2451, 2009, doi: 10.1109/TIM.2009.2016386.
- [8] D. Slišković, R. Grbić, and Ž. Hocenski, "Methods for Plant Data-Based Process Modeling in Soft-Sensor Development," *Automatika*, vol. 52, no. 4, pp. 306–318, 2011, doi: 10.1080/00051144.2011.11828430.
- [9] S. A. Lynn, J. Ringwood, and N. MacGearailt, "Global and Local Virtual Metrology Models for a Plasma Etch Process," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 25, no. 1, pp. 94–103, 2012, doi: 10.1109/TSM.2011.2176759.
- [10] T. C. B. de Moraes, D. R. Rodrigues, U. T. de C. P. Souto, and S. G. Lemos, "A simple voltammetric electronic tongue for the analysis of coffee adultera-

- tions," *Food Chem*, vol. 273, no. 2019, pp. 31–38, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.04.136.
- [11] J. Wan, S. Pampuri, P. G. O'Hara, A. B. Johnston, and S. McLoone, "On Regression Methods for Virtual Metrology in Semiconductor Manufacturing," in *25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CIICT 2014)*, Limerick: The Institution of Engineering and Technology (IET), 2014, pp. 380–385. doi: 10.1049/cp.2014.0718.
- [12] S. Lynn, J. Ringwood, E. Ragnoli, S. McLoone, and N. MacGearailty, "Virtual metrology for plasma etch using tool variables," in *2009 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, Berlin: IEEE, 2009, pp. 143–148. doi: 10.1109/ASMC.2009.5155972.
- [13] B. Lin, B. Recke, J. K. H. Knudsen, and S. B. Jørgensen, "A systematic approach for soft sensor development," *Comput Chem Eng*, vol. 31, no. 5–6, pp. 419–425, 2007, doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.05.030.
- [14] A. A. Khan, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, "Virtual metrology and feedback control for semiconductor manufacturing processes using recursive partial least squares," *J Process Control*, vol. 18, no. 10, pp. 961–974, 2008, doi: 10.1016/j.jprocont.2008.04.014.
- [15] D. Wang, L. Jun, and R. Srinivasan, "Data-Driven Soft Sensor Approach for Quality Prediction in a Refining Process," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 6, no. 1, pp. 11–17, Feb. 2010, doi: 10.1109/TII.2009.2025124.
- [16] Z. Ge and Z. Song, "A comparative study of just-in-time-learning based methods for online soft sensor modeling," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 306–317, 2010, doi: 10.1016/j.chemolab.2010.09.008.
- [17] T. Saidi, M. Moufid, O. Zaim, N. El Bari, and B. Bouchikhi, "Voltammetric electronic tongue combined with chemometric techniques for direct identification of creatinine level in human urine," *Measurement*, vol. 115, no. 2018, pp. 178–184, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.10.044.
- [18] G. A. Susto, S. Pampuri, A. Schirru, A. Beghi, and G. De Nicolao, "Multi-step virtual metrology for semiconductor manufacturing: A multilevel and regularization methods-based approach," *Comput Oper Res*, vol. 53, no. 2015, pp. 328–337, 2015, doi: 10.1016/j.cor.2014.05.008.
- [19] D. M. Hawkins, "Multivariate outlier detection," in *Identification of Outliers*, Dordrecht: Springer, 1980, ch. Identifica, pp. 104–114. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-015-3994-4_8.
- [20] J. Aldas Manzano and E. Uriel Jimenez, *Análisis multivariante aplicado con R*, Ediciones. 2017.

- [21] M. Aslam, "Introducing Grubbs's test for detecting outliers under neutrosophic statistics – An application to medical data," *J King Saud Univ Sci*, vol. 32, no. 6, pp. 2696–2700, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jksus.2020.06.003.
- [22] D. Cousineau and S. Chartier, "Outliers detection and treatment: a review," *Int J Psychol Res (Medellin)*, vol. 3, no. 1, pp. 58–67, Jun. 2010, doi: 10.21500/20112084.844.
- [23] M. R. Elliott and N. Stettler, "Using a mixture model for multiple imputation in the presence of outliers: the 'Healthy for life' project," *J R Stat Soc Ser C Appl Stat*, vol. 56, no. 1, pp. 63–78, Jan. 2007, doi: 10.1111/j.1467-9876.2007.00565.x.
- [24] X. Dang and R. Serfling, "A numerical study of multiple imputation methods using nonparametric multivariate outlier identifiers and depth-based performance criteria with clinical laboratory data," *J Stat Comput Simul*, vol. 81, no. 5, pp. 547–560, May 2011, doi: 10.1080/00949650903437842.
- [25] P. H. Westfall and K. S. S. Henning, *Understanding Advanced Statistical Methods*. Boca Raton: FL: CRC Press, 2013.
- [26] P. H. Westfall, "Kurtosis as Peakedness, 1905–2014. R.I.P.," *Am Stat*, vol. 68, no. 3, pp. 191–195, Jul. 2014, doi: 10.1080/00031305.2014.917055.
- [27] K. A. R. Medeiros, C. R. H. Barbosa, and É. C. De Oliveira, "Nonintrusive method for measuring water flow in pipes," *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*, pp. 1–6, 2015.
- [28] G. Dinardo, L. Fabbiano, and G. Vacca, "Fluid flow rate estimation using acceleration sensors," in *2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 2013, pp. 221–225. doi: 10.1109/ICSensT.2013.6727646.
- [29] N. O. Pirow, T. M. Louw, and M. J. Booyesen, "Non-invasive estimation of domestic hot water usage with temperature and vibration sensors," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 63, pp. 1–7, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.07.003>.
- [30] R. P. Evans, J. D. Blotter, and A. G. Stephens, "Flow Rate Measurements Using Flow-Induced Pipe Vibration," *J Fluids Eng*, vol. 126, no. 2, pp. 280–285, May 2004, doi: 10.1115/1.1667882.
- [31] R. Safari and B. Tavassoli, "Initial test and design of a soft sensor for flow estimation using vibration measurements," in *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, 2011, pp. 809–814. doi: 10.1109/ICCIAutom.2011.6356765.
- [32] K. Medeiros, C. Barbosa, and E. Oliveira, *Non-intrusive method for measuring water flow rate in pipe*, vol. 14. 2015.

- [33] H. Jacobs, Y. Skibbe, M. Booyesen, and C. Makwiza, "Correlating Sound and Flow Rate at a Tap," *Procedia Eng*, vol. 119, pp. 864–873, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.953>.
- [34] H. Göksu, "Flow Measurement by Wavelet Packet Analysis of Sound Emissions," *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 51, no. 3–4, pp. 104–112, 2018, doi: [10.1177/0020294018768340](https://doi.org/10.1177/0020294018768340).
- [35] S. K. Venkata and B. R. Navada, "Estimation of flow rate through analysis of pipe vibration," *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 12, no. 4, pp. 294–300, 2018, doi: [10.2478/ama-2018-0045](https://doi.org/10.2478/ama-2018-0045).
- [36] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd ed. Burlington: MA: Academic Press, 2009. doi: [10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8).
- [37] A. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja, *Independent Component Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001. doi: [10.1002/0471221317](https://doi.org/10.1002/0471221317).
- [38] A. Zeiler, R. Faltermeier, I. R. Keck, A. M. Tomé, C. G. Puntonet, and E. W. Lang, "Empirical Mode Decomposition - an introduction," in *international joint conference on neural networks (IJCNN)*, 2010, pp. 1–8. doi: [10.1109/IJCNN.2010.5596829](https://doi.org/10.1109/IJCNN.2010.5596829).
- [39] L. Long, X. Wen, and Y. Lin, "Denoising of seismic signals based on empirical mode decomposition-wavelet thresholding," *JVC/Journal of Vibration and Control*, vol. 27, no. 3–4, pp. 311–322, 2021, doi: [10.1177/1077546320926846](https://doi.org/10.1177/1077546320926846).
- [40] S. Braun and M. Feldman, "Decomposition of non-stationary signals into varying time scales: Some aspects of the EMD and HVD methods," *Mech Syst Signal Process*, vol. 25, no. 7, pp. 2608–2630, 2011, doi: [10.1016/j.ymsp.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.04.005).
- [41] M. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin, and M. E. Torres, "Descomposición empírica en modos por conjuntos completa con ruido adaptativo y aplicaciones biomédicas," in *Memorias del XVIII Congreso Argentino de Bioingeniería SABI*, Mar del Plata, Sep. 2011, pp. 1–10.
- [42] J. A. Jimenez, M. A. Becerra, and E. Delgado-Trejos, "Heart Murmur Detection using Ensemble Empirical Mode Decomposition and Derivations of the Mel-Frequency Cepstral Coefficients on 4-area Phonocardiographic Signals," in *Computing in Cardiology 2014*, 2014, pp. 493–496.
- [43] H. Yang, T. Ning, B. Zhang, X. Yin, and Z. Gao, "An adaptive denoising fault feature extraction method based on ensemble empirical mode decomposition and the correlation coefficient," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 1–9, 2017, doi: [10.1177/1687814017696448](https://doi.org/10.1177/1687814017696448).
- [44] X. Zhu, Y. Yuan, P. Zhou, B. Xu, and Z. Han, "An improved Hilbert vibration decomposition method for analysis of rotor fault signals," *Journal of the Brazilian Society*

of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 39, no. 12, pp. 4921–4927, 2017, doi: 10.1007/s40430-017-0886-6.

- [45] H. Xu, S. Yuan, and L. Zong, "Analysis of the Time-frequency Characteristics of Internal Combustion Engine Vibration Signal based on Hilbert-Huang Transform," in *3rd International Congress on Image and Signal Processing*, IEEE, 2010, pp. 3400–3404. doi: 10.1109/CISP.2010.5647350.
- [46] B. Büyükçakir and A. Y. Mutlu, "Comparison of Hilbert Vibration Decomposition with Empirical Mode Decomposition for Classifying Epileptic Seizures," in *52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove: IEEE, 2018, pp. 357–362. doi: 10.1109/ACSSC.2018.8645274.
- [47] M. A. Becerra, D. A. Orrego, C. Mejia, and E. Delgado-Trejos, "Stochastic Analysis and Classification of 4-area Cardiac Auscultation Signals using Empirical Mode Decomposition and Acoustic Features," in *2012 Computing in Cardiology*, 2012, pp. 529–532.
- [48] S. Braun and M. Feldman, "Decomposition of non-stationary signals into varying time scales: Some aspects of the EMD and HVD methods," *Mech Syst Signal Process*, vol. 25, no. 7, pp. 2608–2630, 2011, doi: 10.1016/j.ymssp.2011.04.005.
- [49] S. Sharma and P. Vijayakumar, "An HVD Based Error Detection and Correction of Soft Errors in Semiconductor Memories Used for Space Applications," in *2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, 2012, pp. 563–567. doi: 10.1109/ICDCSyst.2012.6188771.
- [50] Y. Yang, S. Zhang, and Y. Qu, "The Method of Vibration Fault Detection and Diagnosis in Rotor Systems Based on Hilbert-Huang Transform," in *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, IEEE, 2011, pp. 851–854. doi: 10.1109/MACE.2011.5987062.
- [51] M. Vallejo, C. de la Espriella, J. Gómez-Santamaría, A. F. Ramírez-Barrera, and E. Delgado-Trejos, "Soft metrology based on machine learning: a review," *Meas Sci Technol*, vol. 31, no. 3, p. 32001, 2020, doi: 10.1088/1361-6501/ab4b39.
- [52] M. Vallejo, N. Bahamón, L. Rossi, and E. Delgado-Trejos, "Soft Metrology: Concept and Challenges from Uncertainty Estimation," in *Handbook of Metrology and Applications*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 1–31. doi: 10.1007/978-981-19-1550-5_67-1.
- [53] L. Cai, D. Wang, W. Song, and H. Li, "Nonlinear Interval Regression Analysis Based on Spline Fuzzy Model with Interval Coefficients," in *Seventh International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, IEEE, 2016, pp. 210–216. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806459.
- [54] V. I. Denisov and A. V. Faddeenkov, "Specification of spline regression model with variable penalties," in *13th International Scientific-Technical Conference (APEIE)*, IEEE, 2016, pp. 241–243. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806459.

- [55] P. Royston and W. Sauerbrei, "Multivariable Modeling with Cubic Regression Splines: A Principled Approach," *The Stata Journal: Promoting communications on statistics and Stata*, vol. 7, no. 1, pp. 45–70, Feb. 2007, doi: 10.1177/1536867X0700700103.
- [56] P. He, X. Xu, X. Chang, J. Ding, and S. Chen, "Multi-manifold discriminant local spline embedding," *Pattern Recognit*, vol. 129, p. 108714, 2022, doi: 10.1016/j.patcog.2022.108714.
- [57] S. Xiang, F. Nie, and C. Zhang, "Semi-Supervised Classification via Local Spline Regression," in *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, 2010, pp. 2039–2053. doi: 10.1109/TPAMI.2010.35.
- [58] J. Vanegas and F. Vásquez, "Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), an alternative for the analysis of time series," *Gac Sanit*, vol. 31, no. 3, pp. 235–237, May 2017, doi: 10.1016/j.gaceta.2016.10.003.
- [59] J. Shiau, V. Q. Lai, and S. Keawsawasvong, "Multivariate adaptive regression splines analysis for 3D slope stability in anisotropic and heterogenous clay," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.05.016.
- [60] F. Majeed, Y. Y. Ziggah, C. Kusi-Manu, B. Ibrahim, and I. Ahenkorah, "A novel artificial intelligence approach for regolith geochemical grade prediction using multivariate adaptive regression splines," *Geosystems and Geoenvironment*, vol. 1, no. 2, p. 100038, May 2022, doi: 10.1016/j.geogeo.2022.100038.
- [61] P. Bermolen and D. Rossi, "Support vector regression for link load prediction," *Computer Networks*, vol. 53, no. 2, pp. 191–201, 2009, doi: 10.1016/j.comnet.2008.09.018.
- [62] Z. Mundher *et al.*, "Stream-flow forecasting using extreme learning machines : A case study in a semi-arid region in Iraq," *J Hydrol (Amst)*, vol. 542, pp. 603–614, 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.035.
- [63] Y. Ye, L. Wang, Y. Wang, and L. Qin, "An EMD-LSTM-SVR model for the short-term roll and sway predictions of semi-submersible," *Ocean Engineering*, vol. 256, no. April, p. 111460, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111460.
- [64] D. Parbat and M. Chakraborty, "Chaos , Solitons and Fractals A python based support vector regression model for prediction of COVID19 cases in India," *Chaos, Solitons and Fractals Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena*, vol. 138, p. 109942, 2020, doi: 10.1016/j.chaos.2020.109942.
- [65] F. Villa, C. Sánchez, M. Vallejo, J. S. Botero-Valencia, and E. Delgado-Trejos, "Dataset of Flow-Induced Vibrations on a Pipe Conveying Cold Water," *Data (Basel)*, vol. 6, no. 9, p. 100, Sep. 2021, doi: 10.3390/data6090100.



Avances y aplicaciones de investigación en calidad y metrología

•

Las fuentes tipográficas empleadas son Caecilia Lt 14 puntos, para texto corrido, y Avenir Black en títulos.

Este libro supone una valiosa aportación al ámbito del conocimiento de la calidad y la metrología, ya que integra investigaciones aplicadas que responden a problemáticas reales en entornos productivos y de servicios. A lo largo de sus diez capítulos, se presentan metodologías, modelos y herramientas que refuerzan la gestión de la calidad, la innovación sostenible, la digitalización de procesos y la utilización de la inteligencia computacional en diversas aplicaciones. La obra destaca por su enfoque interdisciplinario, ya que en ella se ha trabajado de forma colaborativa y ha participado el programa de Ingeniería de la Calidad de la Institución Universitaria ITM, lo que promueve la investigación formativa y el pensamiento científico. Además, relaciona conceptos de ciencia, tecnología e innovación (CTeI) con necesidades concretas del entorno, lo que permite generar soluciones efectivas y transferibles a la industria y a las pequeñas y medianas empresas.



@editorialitm



@editorialitm



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación