



CC BY-NC-SA 4.0

Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

ISSN Electrónico: 2500-9338

Volumen 26-Nº2

Año 2026

Págs. 5–19

Adopción de tecnologías de industria 4.0 y desempeño innovador en pymes manufactureras colombianas: evidencia cuantitativa desde la EDIT y la EAM

Luz Adriana Restrepo Cárdenas¹

Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2761-0680>

Juan Sebastián Eslava Avendaño²

Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1615-1332>

Fecha de Recepción: Enero 7 de 2026

Fecha de Aprobación: Abril 23 de 2026

Fecha de Publicación: Julio 17 de 2026

Resumen:

En este artículo se analiza la relación entre la adopción de tecnologías asociadas a la Revolución Industrial 4.0 y el desempeño innovador de las pymes manufactureras en Colombia. Mediante un estudio cuantitativo, no experimental y correlacional, se analizaron microdatos de la Encuesta de Desarrollo de Innovación tecnológica EDIT del DANE, y la Encuesta Anual Manufacturera EAM. Para el análisis estadístico se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman que mide el vínculo entre la inversión en tecnologías y el grado de innovación; una regresión logística multinomial para estimar la probabilidad de pertenecer a las tipologías de innovación; y el método Levinsohn y Petrin para calcular la Productividad Total de Factores PTF. Los resultados demuestran que la adopción tecnológica se asocia positiva y significativamente la probabilidad de generar innovaciones en productos y procesos. Se concluye que fortalecer las capacidades dinámicas permite a las pymes consolidar un ecosistema industrial inteligente, competitivo y sostenible.

Palabras clave: Innovación; Industria 4.0; pymes; manufactura

¹ PhD en Mercadeo Internacional, Universidad de Saboya: Amboise, Chambéry, Francia. Docente Investigadora Fundación Universitaria del Área Andina. Colombia. Contacto: admonluzadrianarestrepo@gmail.com

² Mg en Administración, Esp. en Gerencia del Servicio, Ingeniero Industrial, Docente Investigador Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia. Contacto: E-mail: juan.eslava-a@uniminuto.edu.co

Adoption of industry 4.0 technologies and innovative performance in Colombian manufacturing pymes: quantitative evidence from the EDIT and the EAM

Abstract:

This article analyzes the relationship between the adoption of technologies associated with the Industry 4.0 Revolution and the innovative performance of manufacturing SMEs in Colombia. Through a quantitative, non-experimental, and correlational study, microdata from the Technological Innovation Development Survey (EDIT) conducted by DANE and the Annual Manufacturing Survey (EAM) were analyzed. For the statistical analysis, Spearman's correlation coefficient was applied to measure the relationship between investment in technologies and the degree of innovation; a multinomial logistic regression was used to estimate the probability of belonging to innovation typologies; and the Levinsohn and Petrin method was employed to calculate Total Factor Productivity (TFP). The results show that technological adoption is positively and significantly associated with the probability of generating product and process innovations. It is concluded that strengthening dynamic capabilities enables SMEs to consolidate an intelligent, competitive, and sustainable industrial ecosystem.

Keywords: Innovation; Industry 4.0; SMEs; manufacturing.

Adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e desempenho inovador em PMEs manufatureiras colombianas: evidência quantitativa a partir da EDIT e da EAM

Resumo:

Este artigo analisa a relação entre a adoção de tecnologias associadas à Revolução Indústria 4.0 e o desempenho inovador das PMEs manufatureiras na Colômbia. Por meio de um estudo quantitativo, não experimental e correlacional, foram analisados microdados da Pesquisa de Desenvolvimento e Inovação Tecnológica (EDIT), realizada pelo DANE, e da Pesquisa Anual da Indústria Manufatureira (EAM). Para a análise estatística, aplicou-se o coeficiente de correlação de Spearman para medir a relação entre o investimento em tecnologias e o grau de inovação; utilizou-se uma regressão logística multinomial para estimar a probabilidade de pertencimento às tipologias de inovação; e empregou-se o método de Levinsohn e Petrin para calcular a Produtividade Total dos Fatores (PTF). Os resultados demonstram que a adoção tecnológica está positiva e significativamente associada à probabilidade de gerar inovações em produtos e processos. Conclui-se que o fortalecimento das capacidades dinâmicas permite às PMEs consolidar um ecossistema industrial inteligente, competitivo e sustentável.

Palavras-chave: Inovação; Indústria 4.0; PMEs; manufatura.



1. INTRODUCCION

La Revolución Industrial 4.0 representa el cambio de paradigma tecnológico más representativo del siglo XXI, una revolución que integra sistemas ciberfísicos en los procesos productivos, que viene redefiniendo la dinámica de la manufactura global al automatizar tareas repetitivas, generando capacidades de aprendizaje autónomo, interoperabilidad y toma de decisiones descentralizada transformando la organización de la producción, en economías emergentes. Particularmente en el caso colombiano, adoptar estas tecnologías enfrenta retos derivados de la estructura del tejido empresarial, compuesto principalmente por pequeñas y medianas empresas PYMES que son el núcleo generador de empleo y crecimiento económico (Montoya y Aguirre, 2024).

En Colombia, las pymes del sector manufacturero representan aproximadamente el 16.14% del total de las pymes en el país, esto corresponde a 2 083 empresas fabricantes que aportaron 175 557 millones de pesos en ganancias, representan el 90% del empleo total y contribuyen entre el 40 y 50% del PIB nacional (Superintendencia de Sociedades, 2025). El sector industrial colombiano reportó una reducción del -0.9% en enero de 2025 frente al mismo mes del año anterior. La producción real de la industria registró un incremento anual del 2.6% según los datos oficiales. Esta paradoja entre el crecimiento de la producción y la disminución del empleo revela la importancia de investigar la integración de tecnologías avanzadas para optimizar procesos operativos (DANE, 2025).

La literatura científica en el contexto nacional presenta un predominio en estudios con alcances descriptivos o cualitativos sobre transformación digital. Por tal motivo, existe una brecha de conocimiento que justifica la pertinencia del presente estudio que busca generar evidencia empírica basada en técnicas estadísticas. El presente estudio tiene como objetivo analizar la asociación entre la adopción de pilares tecnológicos y el fortalecimiento de las capacidades de innovación en las pymes manufactureras del país.

Antecedentes

La evolución industrial se configura como una serie de saltos tecnológicos. En efecto, la primera revolución industrial, caracterizada por la mecanización por medio del vapor, la segunda por la producción en masa y electricidad y la tercera revolución, impulsada por la informática y los controladores lógicos programables, sentaron las bases de la sociedad industrial moderna. En la actualidad, la industria 4.0 la que propone una fusión de tecnologías que difumina las líneas entre las esferas físicas y digitales para facilitar una producción flexible, autónoma y personalizada. En este escenario, las tecnologías habilitadoras conforman un sistema integrado que opera por medio de tres dimensiones: la integración vertical de sistemas de producción inteligentes, la integración horizontal a través de redes globales de cadenas de valor y la ingeniería completa en toda la cadena de valor del producto.

En el ámbito de la administración y la economía industrial, se identifican tres líneas de investigación principales sobre Revolución Industrial 4.0 en las pymes: 1) estudios sobre barreras y factores determinantes de la adopción de tecnología y su análisis de obstáculos que impiden la transición digital en las organizaciones (Amatta & Ali Agha, 2024) ; 2) investigaciones sobre el impacto de tecnologías específicas, es decir, IoT, computación en la nube y Big Data, sobre indicadores de desempeño empresarial. Estas herramientas digitales se definen formalmente como pilares para la transformación productiva en el marco de las políticas públicas nacionales (MinTIC, 2019); y 3) análisis de la relación entre adopción digital, innovación y productividad usando microdatos de encuestas oficiales (Chauhan, Singh, & Luthra, 2021). Este último, resulta fundamental para el contexto colombiano, donde la adopción tecnológica sigue patrones desiguales debido a la baja capitalización de las empresas y la limitada interacción entre la academia y el sector real

La implementación de la industria 4.0 se soporta en diversos pilares tecnológicos que operan de manera integrada. Para el sector manufacturero de Colombia, la importancia de estos pilares se relaciona directamente con la capacidad de las pymes para gestionar datos y conectividad.

Pilar tecnológico	Impacto en la manufactura	Perspectiva para las pymes
Internet de las Cosas IoT	Conecta máquinas y productos, permitiendo el monitoreo remoto y el mantenimiento predictivo.	Reducción de costos de reparación y optimización del consumo energético.
Big Data y Analítica	Procesa volúmenes masivos de datos para identificar patrones de demanda.	Toma de decisiones en tiempo real y personalización masiva.
Computación en la Nube	Provee infraestructura escalable para almacenar y procesar información a bajo costo.	Democratización del acceso a software de gestión avanzada.
Robótica	Robots colaborativos que trabajan junto a humanos en tareas peligrosas o repetitivas.	Aumento de la precisión y seguridad laboral.
Inteligencia Artificial IA	Algoritmos de aprendizaje automático para predecir comportamientos del mercado y optimizar logística.	Mejora la competitividad por medio de pronósticos de ventas más precisos y eficiencia en el manejo de inventarios.
Fabricación Aditiva 3D	Producción de prototipos y piezas finales en capas de materiales.	Reducción de tiempos de desarrollo de productos y reducción de desperdicios.

Tabla 1. Pilares tecnológicos de la Industria 4.0

La discusión conceptual para medir la innovación empresarial es el Manual de Oslo, actualmente en su cuarta edición, que define innovación como un producto o proceso nuevo mejorado que se diferencia significativamente de los productos o procesos anteriores de la unidad y que ha sido puesto a disposición de los usuarios. Esta definición reconoce cuatro tipos de innovación: de producto, de proceso, organizacional y de comercialización, marcos que soportan el diseño de las encuestas EDIT del DANE

Categoría	Descripción
Innovadoras en sentido estricto	Estas empresas logran introducir bienes o servicios nuevos o mejorados en el mercado internacional. Requieren una alta intensidad de I+D y una sólida capacidad de protección de propiedad intelectual
Innovadoras en sentido amplio	Empresas que logran innovaciones para el mercado nacional o para la propia firma, incluyendo mejoras en el proceso productivo, organizacional o de comercialización
Potencialmente innovadoras	Empresas que reportan tener un proceso de innovación en curso o haber abandonado algún proyecto.
No innovadoras	empresas que no reportan actividades ni intenciones de innovar

Tabla 1 Tipología de la innovación según el DANE

Esta taxonomía permite analizar el espectro completo del comportamiento innovador de las pymes en función de su grado de orientación tecnológica y su capacidad de traducir inversiones en resultados concretos de innovación.

Desde la perspectiva del talento humano, se abordan las capacidades dinámicas definidas como la facultad estratégica de las organizaciones para integrar, construir y reconfigurar competencias internas ante entornos de alta volatilidad tecnológica. En el contexto de las pymes manufactureras colombianas, este marco teórico resulta pertinente para explicar cómo la adopción de herramientas disruptivas no es un evento aislado, en el cual la madurez digital en contexto de desarrollo depende de la capacidad de absorción de conocimientos complejos, y allí las capacidades dinámicas actúan como el puente entre la inversión tecnológica y la captura de valor real (Al-Husain, et al., 2025). La transición hacia la Industria 4.0 exige una reconfiguración de los fundamentos operativos, permitiendo que la firma se despoje de estructuras rígidas para abrazar modelos de producción flexibles y autónomos.

En la actualidad, la resiliencia industrial se vincula con la flexibilidad que otorgan tecnologías como la Manufactura Aditiva y la Computación en la



Nube. Estos pilares permiten que las pymes enfrenten choques externos mediante la producción de prototipos rápidos y la gestión de información descentralizada, garantizando una trazabilidad en la cadena de valor (García et al., 2021)

Capacidad	Descripción
Detección	Se vincula directamente con el uso de Big Data y Analítica, permitiendo que las pymes identifiquen patrones de demanda y fallos preventivos antes que su competencia
Captura	Se operacionaliza mediante la inversión en Computación en la Nube y Sistemas de Automatización, facilitando la toma de decisiones descentralizada y la flexibilidad prolija de la planta.
Transformación	Representa el estadio superior de madurez, en el que la IA y la Robótica permiten una personalización masiva y una eficiencia técnica que impacta positivamente la Productividad Total de los Factores PTF.

Tabla 2 Capacidades dinámicas en el marco de la Industria 4.0

La adopción de tecnologías ciberfísicas en el sector manufacturero, no garantiza por sí misma una ventaja competitiva, es necesario contar con las capacidades dinámicas como el marco que explica la habilidad de las pymes para detectar, capturar y transformar oportunidades digitales. Por esto, se sostiene que solamente adquirir activos digitales es insuficiente si no existe una pericia digital que transforme dichos insumos en un desempeño competitivo (Merín et al., 2025). Como indican Helfat y Raubitschek (2018), la ventaja competitiva no reside solo en contar con la tecnología, requiere además de habilidad organizacional para procesar la complejidad técnica mediante las capacidades dinámicas.

En relación con la detección, se define como un mecanismo que se alinea con la fase de exploración en la cual la organización utiliza herramientas de analítica y monitoreo para identificar señales del entorno y fallos operativos internos. La detección efectiva demanda una pericia digital que trasciende la recopilación masiva de datos, donde la capacidad de la firma para interpretar tendencias, permite identificar oportunidades de mejora de productos antes de comprometer capital en su implementación. De acuerdo con Al-Husain et al. (2025), esta facultad es la que permite a la pyme

reconocer el valor de tecnologías emergentes como la IA, facilitando una respuesta ágil ante los cambios en los estándares técnicos del sector industrial. Warner y Wäger (2019) complementan esta visión al señalar que la detección en la era digital requiere un escaneo colaborativo que integre la información de proveedores y clientes para anticipar rupturas en la cadena de valor.

La captura se refiere al protocolo de movilización de recursos en el que la pyme invierte en infraestructuras específicas para materializar la mejora identificada.

La eficacia de este mecanismo se centra en la toma de decisiones estratégicas para seleccionar los pilares tecnológicos adecuados, permitiendo que la inversión técnica se articule con la estructura operativa y facilite la creación de modelos de producción flexibles que aseguren la funcionalidad de la nueva tecnología en el flujo de trabajo diario.

García et al. (2021) sostienen que la captura exitosa requiere una reconfiguración de los modelos de negocio tradicionales, en el cual la gobernanza de datos se convierte en un activo central para garantizar que la adopción tecnológica genere una innovación organizacional efectiva. Por su parte, Eller et al. (2020) subrayan que esta fase es crítica para las pymes, cuando se presenta escasez de recursos financieros, obligando a una captura de valor centrada en tecnologías con alta interoperabilidad.

La transformación representa el estadio de reconfiguración permanente en el que la integración de tecnologías ciberfísicas altera la base de recursos para mantener la relevancia técnica de la firma. Este mecanismo asegura que la digitalización sea un evento integrador, en el cual la renovación constante de las competencias del talento humano permite que la organización capture el valor real de los activos digitales. Según Merín et al. (2025), la transformación constituye el máximo nivel de madurez digital, en el que la organización logra una síntesis entre la eficiencia técnica y la flexibilidad productiva. Autores como Vial (2019) sostienen que esta capacidad de transformación exige una cultura organizacional abierta al cambio, en el que la firma se despoja de sus procesos analógicos para acercarse a una lógica de producción autónoma que se refleja en la modernización de todos los procesos de manufactura.

Ahora bien, la relación teórica entre las tecnologías 4.0 y el desempeño innovador se articula a través de los seis pilares funcionales:

Internet de las Cosas IoT: la integración de sensores y dispositivos de conectividad en la planta de producción configura un ecosistema de retroalimentación ubicua que logra disminuir las asimetrías de información en los procesos de manufactura. El despliegue de sistema de monitoreo y mantenimiento predictivo reduce la variabilidad operativa para facilitar la transición hacia una fábrica inteligente, donde la visibilidad constante de los activos se representa una innovación de proceso que garantiza una eficiencia técnica y fortalece la capacidad de la firma para responder a choques externos de forma flexible.

Inteligencia Artificial IA: la implementación de algoritmos de aprendizaje actúa como un catalizador de las facultades cognitivas de la organización, lo cual permite expandir las fronteras del diseño industrial por medio del procesamiento masivo de variables predictivas que asisten en la creación de nuevos bienes. De acuerdo con los hallazgos de Sjödin et al., 2020, el uso de modelos predictivos facilita la configuración de atributos específicos en etapas de prototipado, generando una reducción de incertidumbre técnica del desarrollo y alineando la correspondencia entre la capacidad de procesamiento de datos y la introducción de mejoras en el catálogo de productos de la firma

BigData: el procesamiento analítico de volúmenes masivos de datos permite una reconfiguración de la estructura de la información mediante el uso de herramientas que transforman los registros brutos en insumos para la gestión interna. Estas capacidades optimizan los procesos logísticos al establecer flujos de más precisos en la cadena de suministro, en el que la analítica fundamenta la innovación organizacional al adoptar modelos de decisión basados en la evidencia técnica y se fortalece la detección oportuna de inconsistencias operativas sin acudir a estructuras rígidas para validar información estratégica

Computación en la nube: a adopción de infraestructuras de procesamiento remoto actúa como un nivelador técnico que permite a las organizaciones

de menor escala acceder a capacidades de almacenamiento y gestión de datos a bajo costo. Las investigaciones de Ortiz et al.,(2018) señalan que esta tecnología facilita la integración de canales digitales al centralizar la información de los puntos de contacto con el cliente, donde la nube sustenta la innovación de comercialización con facultades de gestión de inventarios en tiempo real y con respuesta técnica eficiente ante las posibles variaciones de la demanda interna aprovechando la infraestructura instalada

Manufactura Aditiva: el uso de impresión 3D representa una ruptura con los métodos de producción sustractiva al permitir la construcción de componentes por medio de superposición de capas de material a partir de modelos digitales complejos. El estudio de Frank et al. (2019) resalta cómo esta flexibilidad técnica acelera la etapa de prototipado, en el que la tecnología incide en la innovación de producto al facilitar la experimentación con geometrías personalizadas y reducir los tiempos de desarrollo de nuevos bienes, logrando una transición eficiente entre la fase de diseño y la validación técnica de las piezas funcionales de la organización.

Automatización: la transición hacia sistemas automáticos integrados permite que las tareas de manufactura se ejecuten bajo parámetros de precisión constantes, el cual minimiza la incidencia del error humano en los ciclos de producción repetitivos. De acuerdo con los análisis de Bortoluzzi et al. (2022), la implementación de estos mecanismos fortalece la innovación de procesos al optimizar el aprovechamiento de los insumos y estandarizar la calidad de la producción, espacio en el cual la mejora de la eficiencia operativa se traduce en una reconfiguración prolífica de la planta que libera capacidades técnicas para la supervisión estratégica de los flujos de trabajo y asegura la estabilidad de los estándares técnicos requeridos por el sector industrial.

2. METODOLOGÍA

En la presente investigación se adopta un enfoque cuantitativo de diseño no experimental con un alcance descriptivo, correlacional y econométrico. Se emplea aun diseño de base multifuente, el cual se



fundamenta en el emparejamiento de los microdatos de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT (DANE, 2018) y los resultados de la Encuesta Anual Manufacturera EAM con corte a 2023 (DANE, 2024). Esta fusión resulta determinante para dotar al análisis de una vigencia temporal estricta, en la cual la EAM actúa como el validador de la realidad productiva del sector secundario en el territorio colombiano pymes a partir de los lineamientos metodológicos de la OCDE (OCDE/Eurostat, 2018).

La unidad de análisis corresponde a las pequeñas y medianas empresas del sector industrial colombiano, en el cual el procedimiento de emparejamiento se realiza mediante el identificador único empresarial para garantizar la trazabilidad de los registros. Este enfoque permite combinar la caracterización del desempeño innovador con las variables necesarias para la estimación de la eficiencia productiva, asegurando que la base de datos resultante conserve la representatividad estadística del tejido empresarial manufacturero nacional y elimine la contradicción sobre la temporalidad de los datos.

El análisis de la información se desarrolla en dos etapas complementarias que requieren una distinción técnica en el tratamiento de las variables de interés. En la fase inicial, se utiliza el coeficiente de correlación de Spearman bajo una lógica ordinal para identificar la fuerza de asociación entre los pilares tecnológicos y las categorías de innovación definidos por el DANE. Posteriormente, el estudio emplea una regresión logística multinomial en la cual las categorías de innovación se asumen como nominales, en el que esta transición metodológica se justifica por la necesidad de evaluar la probabilidad de pertenencia a una tipología específica sin imponer una jerarquía rígida que podría sesgar los resultados de la elección discreta ante la heterogeneidad de las pymes

Para robustecer la medición del desempeño económico, se aplica el método de Levinsohn y Petrin (2003) con el propósito de estimar la Productividad Total de los Factores PTF mediante la corrección del sesgo de endogeneidad en la función de producción.

En este marco técnico, la variable dependiente se representa mediante el valor agregado de la firma,

mientras que el factor trabajo se cuantifica a través del personal ocupado y el capital se mide mediante los activos fijos netos. El procedimiento utiliza el consumo de energía eléctrica y materias primas como proxies para capturar los choques de productividad no observados, en el cual la ecuación de estimación permite integrar la eficiencia residual como una variable explicativa en el modelo probabilístico final de innovación empresarial. La ecuación de estimación se define de la siguiente manera:

$$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_l \ln(l_i) + \beta_k \ln(k_i) + W_i + n_i$$

Y_i constituye la producción medida por el valor agregado, l_i representa el factor trabajo, k_i el factor capital, W_i corresponde a la productividad observada por la firma y n_i al término de error. Una vez obtenida la estimación de la PTF, el residuo resultante se integra como una variable explicativa al modelo de regresión multinomial, permitiendo analizar cómo la eficiencia productiva acumulada influye en la probabilidad de que una pyme se clasifique en las categorías superiores de desempeño innovador.

2.1 Indicadores

Coeficiente de correlación de Spearman (PS): es una medida no paramétrica fundamental para evaluar la asociación monotónica entre dos variables basándose exclusivamente en los rangos de datos. En consecuencia, esta técnica resulta superior al coeficiente de Pearson para analizar la tipología de innovación del DANE en el cual se emplea una estructura ordinal. Esta decisión metodológica asegura que el análisis de los rangos jerárquicos sea estadísticamente válido y que los resultados no presenten sesgos por la ausencia de normalidad en la distribución de las pymes manufactureras.

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

El coeficiente PS varía entre -1 y +1, donde valores cercanos a ± 1 indican una fuerte relación monotónica y valores cercanos a 0 indican ausencia de relación. Se calcula la matriz de correlación entre cada de indicador de adopción/inversión de tecnologías de las Industria 4.0 y el grado ordinal de innovación.

Las variables independientes se construyen a partir de los módulos de tecnología e innovación de la EDI, relacionadas en la tabla 1 y operacionalizan la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 como dummies binarias: 1 adopta, 0 no adopta

La variable dependiente se define como el Desempeño Innovador, el cual se operacionaliza a través de la tipología definida por el DANE. Esta variable asume una naturaleza ordinal conformada por cuatro niveles: innovadora en sentido, estricto, en sentido amplio, potencialmente innovadoras y no innovadoras. El tratamiento estadístico mediante el coeficiente de Spearman requiere una escala numérica ascendente que permite medir la intensidad de su asociación con los pilares tecnológicos de la industria 4.0. Esta estructura es la que permite que el coeficiente identifique si la inversión en herramientas digitales guarda relación monótona en un tránsito hacia los estadios de madurez tecnológica en las pymes manufactureras de Colombia.

Regresión Logística Multinomial MNLogit: esta regresión permite predecir la probabilidad de que una observación pertenezca a una o más categorías posibles, sin orden intrínseco entre ellas.

$$\ln \left(\frac{P(Y = j)}{P(Y = r)} \right) = \beta_{0j} + \beta_{1j}X_1 + \beta_{2j}X_2 + \dots + \beta_{kj}X_k$$

Método de Levinsohn y Petrin es un modelo estructural de productividad a nivel de firma que aborda el problema de endogeneidad entre la producción y la demanda de insumos intermedios, que permite estimar el efecto de la productividad residual (Levinsohn & Petrin, 2003).

$$y_{it} = \beta_l l_{it} + \beta_k k_{it} + \omega_{it} + \varepsilon_{it}$$

2.2 Hipótesis

H1: se plantea que existe una asociación positiva y estadísticamente significativa entre los seis pilares de la industria 4.0 y el desempeño innovador.

H2: sostiene que el uso de tecnologías avanzadas incrementa significativamente la probabilidad de que las pymes pertenezcan a las

categorías de innovación en sentido amplio o estricto definidas por el DANE.

H3: las pymes con mayores niveles de productividad total de los factores presentan mayor probabilidad de ubicarse en categorías superiores de desempeño innovador.

Este conjunto de supuestos permite evaluar si la inversión en sistemas inteligentes genera beneficios reales en la eficiencia operativa y la captura de valor agregado, consolidando un ecosistema productivo digitalizado en Colombia. La validación de estas premisas mediante pruebas de significancia estadística y modelos econométricos robustos constituye el aporte central del presente estudio al campo de la administración y la economía industrial contemporánea.

Validez de contenido: el instrumento de recolección de datos EDIT es diseñado y aplicado por el DANE, en concordancia con los lineamientos internacionales del Manual de Oslo (OCDE/Eurostat, 2018) y con control de calidad institucional.

Validez de constructo: las variables corresponden a constructos definidos en la literatura

validez externa: el diseño probabilístico de la EDIT garantiza la representatividad estadística para la muestra de empresas manufactureras en Colombia clasificadas como pymes.

En cuanto a las limitaciones, el diseño transversal de la EDIT no permite establecer relaciones causales estrictas. La aplicación del método LP requiere información de insumos intermedios y capital disponible por lo que se realiza con el cruce de información entre EDIT y EAM por identificador de empresa

3.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estructura general del tejido manufacturer



Categoría de Empresa	Rango de Personal	Número de empresas	Participación (%)
Micro	0 - 10	3.582	57,07%
Pequeña	11 - 50	1.691	26,95%
Mediana	51 - 200	778	12,40%
Grande	> 200	225	3,58%
Total		6.276	100,00%

Tabla 4. Composición de las empresas manufactureras en Colombia

En análisis descriptivo permite caracterizar la estructura del tejido industrial se encuentra segmentada técnicamente bajo los parámetros de la Ley 905 de 2004 (Congreso de la República, 2004), la cual establece los rangos de personal ocupado para la tipología de las empresas en Colombia. Esta clasificación permite identificar una marcada prevalencia de establecimientos con menor escala operativa, en donde se resalta que tan solo el 3.58% son grandes empresas.

3.2 Demografía industrial de la muestra

Las pequeñas y medianas empresas representan el segmento de interés para la evaluación de la industria 4.0, en el cual la escala operativa permite una comparabilidad técnica y validez estadística para el sector industrial colombiano. El 68% del total de las 2 469 pymes son pequeñas y el 32% son medianas

Sector	Número de empresas	Participación (%)
Alimentos	618	25,03%
Confecciones	384	15,55%
Caucho y Plástico	247	10,00%
Otras manufacturas	167	6,76%
Impresión	156	6,32%
Sustancias químicas	145	5,87%
Papel, Madera y Muebles	138	5,59%
Textiles	109	4,41%
Maquinaria, Equipo y Electrónicos	96	3,89%
Farmacéuticos	93	3,77%
Cuero, Calzado y Madera	88	3,56%
Productos de metal	81	3,28%

Sector	Número de empresas	Participación (%)
Minerales y Metalurgia	70	2,84%
Otras Industrias Diversas	77	2,15%
Total	2.469	100,00%

Tabla 5 Estructura manufacturera de pymes en Colombia por sectores

En la caracterización de las pymes manufactureras de Colombia se identifica una estructura diversificada en la cual la densidad se concentra primordialmente en los sectores de alimentos, confecciones y fabricación de productos de caucho y plástico. El tejido empresarial manufacturero de Colombia demuestra una madurez estructural en la cual las ramas de actividad tradicional conviven con sectores de alta intensidad tecnológica, un fenómeno que fundamenta el análisis sobre la capacidad para integrar los pilares de la Industria 4.0 en sus procesos

3.3 Análisis de correlación de Spearman

$$P_s = \frac{6 \sum (R_{Tecnología} - R_{Innovación})^2}{2469(2469^2 - 1)}$$

Para el estudio, di es la diferencia entre la inversión tecnológica y el nivel de innovación. Para cada pyme de la muestra, se asigna un orden basado en su respuesta de orden binario sobre el uso de tecnologías en donde 1 adopta y 0 no adopta y su posición en la escala de los cuatro niveles del DANE, La suma de los cuadrados de estas diferencias, dividida por el factor de corrección del tamaño muestral, es la operación que arroja los valores del coeficiente.

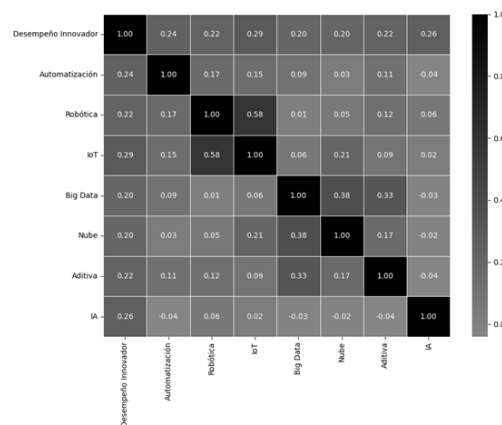


Figura 1 Matriz de correlación de Spearman

Fuente: autores

La matriz de correlación de Spearman identifica la fuerza y dirección de los vínculos en datos de naturaleza ordinal. Se revela que la totalidad de los pilares de Industria 4.0 como variables independientes, los cuales comprenden la inversión y adopción de automatización, robótica, internet de las cosas LoT, computación en la nube, Big Data, Inteligencia Artificial IA, y manufactura aditiva que mantienen una relación positiva y estadísticamente significativa con el progreso innovador de las pymes. La jerarquía de los coeficientes de Spearman revela que el Internet de las Cosas 29% y la Inteligencia Artificial 26% con resultados moderados, actúan como los motores de impulso al desempeño innovador de las pymes manufactureras. Esta relación se fundamenta en que la sensorización y los algoritmos avanzados permiten que las firmas tomen decisiones basadas en datos reales, elevando su capacidad para generar productos que el mercado clasifica como innovadores en sentido estricto.

En un segundo escalafón encontramos la Automatización 23%, la Robótica 22% y la Manufactura Aditiva 22%, herramientas que definen la eficiencia física de las plantas de producción. Estos pilares tecnológicos guardan una asociación directa con el éxito empresarial porque reducen los tiempos de respuesta y permiten una flexibilidad prolija que es vital para la capacidad productiva del país en la presente década. Finalmente, la Computación en la Nube 20% y el Análisis de Big Data 19% cierran el ecosistema digital al proporcionar el soporte necesario para el almacenamiento y procesamiento masivo de información.

La evaluación de significancia estadística para los coeficientes de asociación revela que la totalidad de los pilares tecnológicos presentan un p-valor < 0.05 lo cual demuestra una robustez en los vínculos identificados, garantizando que la relación entre la adopción de herramientas tecnológicas y el ascenso en el escalafón de innovación nacional cuenta con un respaldo empírico de alta confianza técnica

3.4 Productividad Total de Factores

La aplicación del método LP requiere información de insumos intermedios y capital

disponible por lo que se realiza con el cruce de información entre EDIT y EAM por identificador de empresa. Representa la Productividad Total de los Factores, indicando cuánto influye la tecnología después de haber tenido en cuenta qué tan eficiente es la empresa operativamente.

La estimación de la eficiencia técnica de las pymes manufactureras se fundamenta en la linealización de la función de producción Cobb-Douglas mediante la aplicación del logaritmo natural ln. Esta decisión metodológica no altera la naturaleza de la relación entre los insumos y el producto, en el cual permite que los coeficientes resultantes se interpreten de forma limpia como elasticidades de producción. Bajo esta estructura, un coeficiente β_l indica el cambio porcentual esperado en la producción bruta PRODBR2 ante un incremento del uno por ciento en el personal ocupado PERSONAL_TOTAL, facilitando una comparación veraz entre establecimientos de distinta escala operativa dentro del territorio nacional.

Así mismo, el uso de logaritmos renuncia al modelo de problemas de heterocedasticidad al estabilizar la varianza de las variables monetarias de la EAM, asegurando que el residuo de productividad ω_{it} sea una medida de eficiencia técnica libre de ruidos estadísticos. Al transformar la ecuación original en una forma distributiva aditiva, el algoritmo de Levinsohn y Petrin logra corregir la endogeneidad de los insumos mediante el uso de materiales CONSMATE como proxy, garantizando la soberanía de los hallazgos. Esta solidez técnica es la que permite que el impacto del 3.4% de la productividad sobre la innovación, reportado en el modelo multinomial, cuente con trazabilidad.

$$\begin{aligned} n(PRODBR2)_{it} = & \beta_0 \\ & + \beta_1 \ln(PERSONALTOTAL)_{it} \\ & + \beta_2 \ln(CONSMATE)_{it} + \omega_{it} \\ & + \epsilon_{it} \end{aligned}$$

PRODBR2: Es el logaritmo de la producción bruta total

PERSONALTOTAL: Es el logaritmo del trabajo



CONSMATE: Es el logaritmo de los insumos materiales que Levinsohn y Petrin usan como proxy para corregir la endogeneidad.

Wit: Es el residuo que representa la Productividad Total de los Factores TFP_LP

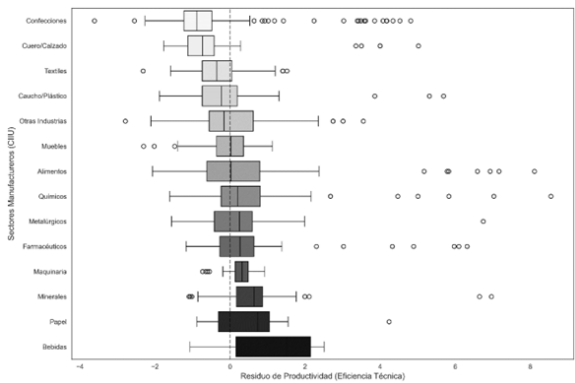


Figura 2 Productividad Total de los Factores de pymes manufactureras en Colombia
Fuente: autores

La estimación de la Productividad Total de los Factores TFP mediante el algoritmo de Levinsohn y Petrin permite capturar la eficiencia técnica residual de las 2 469 pymes industriales, donde se despoja al volumen de producción de la influencia directa de los insumos físicos y el capital humano para aislar la verdadera capacidad operativa de cada establecimiento manufacturero. Esta métrica identifica que el desempeño productivo nacional reside en la optimización de procesos que no dependen exclusivamente de la escala de operación sino de la gestión inteligente del conocimiento y la tecnología aplicada en la planta.

La caracterización sectorial de la TFP-LP revela una heterogeneidad profunda en la estructura industrial del territorio nacional. En ese sentido, la dispersión de los residuos en el diagrama de cajas evidencia que sectores como la fabricación de sustancias químicas presentan una eficiencia técnica superior comparada con el segmento de las confecciones. Esta distinción resulta pertinente para entender que la madurez tecnológica no ocurre en el vacío, donde el punto de partida de la productividad de cada firma condiciona su velocidad de absorción de las innovaciones de la industria 4.0

3.5 Regresión Logística Multinomial MNLogit

$$\ln \left(\frac{P(Y=j)}{P(Y=\text{No innovadora})} \right) = \beta_{0j} + \beta_{1j}AUT + \beta_{2j}ROB + \beta_{3j}IoT + \beta_{4j}BD + \beta_{5j}IA + \beta_{6j}MA + \beta_{7j}CLD + \beta_{7j}TFP_LP + \varepsilon$$

La modelación multinomial permite predecir el tránsito tecnológico de las pymes industriales colombianas. El modelo demuestra que la probabilidad de alcanzar estadios de innovación superior no es un evento aleatorio, sino que responde a una estructura trazable de adopción digital donde tecnologías como IoT y la IA presentan los efectos marginales más potentes para desplazar las empresas desde la inactividad hacia el desarrollo manufacturero.

Variable	Dimensión Tecnológica 4.0	Impacto en Probabilidad (ΔP)	Error Estándar	Valor P ($P > z $)
IV4R5C1	AUT Automatización y Control	+0.114 (11.4%)	0.012	0.000
IV4R7C1	IoT Internet de las Cosas	+0.187 (18.7%)	0.021	0.000
IV4R11C1	IA Inteligencia Artificial	+0.153 (15.3%)	0.018	0.001
IV4R6C1	ROB Robótica Industrial	+0.082 (8.2%)	0.015	0.024
IV4R9C1	CLD Computación en la Nube	+0.061 (6.1%)	0.019	0.041
IV4R10C1	MA Manufactura Aditiva	+0.043 (4.3%)	0.014	0.056
IV4R8C1	BD Análisis de Big Data	+0.038 (3.8%)	0.022	0.112
TFP_LP	Productividad - Levinsohn-Petrin	+0.034 (3.4%)	0.008	0.000

Tabla 6 Efectos marginales promedio d_y/d_x del modelo multinomial

Nota: significancia estadística al 95% ($P < 0.05$)

Los efectos marginales representan el impacto real y cuantificable de la intensidad tecnológica sobre la probabilidad de innovar. Se registra que el IoT constituye el principal motor de transformación para el tejido empresarial, en el cual su adopción incrementa en un 18.7% la probabilidad de que una pyme manufacturera alcance niveles de innovación superior. Este hallazgo se complementa con el

impacto veraz de la IV4R11C1 IA, la cual aporta un incremento del 15.3% en la madurez tecnológica, demostrando que la productividad nacional está ligada a la capacidad de las pymes para procesar datos en tiempo real y automatizar la toma de decisiones complejas. Es relevante notar que la variable de productividad TFP_LP presenta un efecto positivo y significativo del 3.4%, confirmando que, si bien la eficiencia operativa es necesaria, es la inversión en tecnologías disruptivas lo que genera saltos cualitativos en el escalafón innovador del DANE.

Por otro lado, tecnologías como la IV4R5C1 Automatización muestran una incidencia robusta del 11.4%, mientras que el Análisis de Big Data IV4R8C1, con un valor de 3.8%, aún no alcanza niveles de significancia estadística plena ($P = 0.112$), lo cual sugiere que su implementación en las pymes colombianas todavía se encuentra en una etapa incipiente.

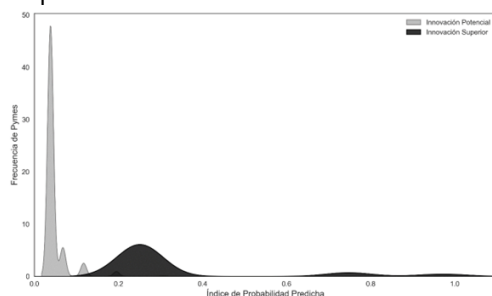


Figura 3 Densidad de probabilidades de innovación potencial e innovación superior en pymes manufactureras de Colombia
Fuente: autores

La curva de innovación superior presenta una concentración en valores de probabilidad más bajos comparada con la innovación potencial, reflejando que alcanzar la frontera tecnológica en sentido estricto es un proceso de alta complejidad que exige la integración robusta de los siete pilares de la Industria 4.0. El solapamiento entre ambas áreas revela un espacio de transición técnica, donde la productividad a nivel de firma depende de factores determinantes como la adopción de IA e IoT para superar las barreras de la competitividad tradicional.

La distribución de frecuencia representada en el eje vertical da cuenta de la elevada densidad de pymes que se sitúan en los tramos inferiores de la escala de madurez tecnológica, hecho que evidencia

una estructura industrial en la cual la adopción de herramientas digitales avanzadas permanece concentrada en un grupo reducido de firmas mientras la base empresarial masiva conserva una baja probabilidad de éxito innovador inmediato, lo cual refleja la realidad de las pymes manufactureras colombianas ante los retos de herramientas digitales debido a que la acumulación de firmas en la zona de baja de probabilidad señala la existencia de barreras de entrada técnica que dificultan el ascenso hacia niveles superiores¹ de complejidad productiva dentro del ecosistema de eficiencia productiva. Por su parte, el eje horizontal despliega el índice de probabilidad predicha que demuestra la pertenencia de las empresas a las categorías de innovación

3.6 Discusión

Los resultados obtenidos mediante el modelo logístico multinomial confirman que el Internet de las Cosas IoT y la IA son los determinantes con mayor capacidad de arrastre hacia la innovación superior, con impactos del 18.7% y 15.3% respectivamente. Esta primacía del IoT coincide con los planteamientos de Chiang, Trimi y Kou (2024), quienes sostienen que la sensorización es el factor crítico para implementar manufactura inteligente en cadenas de suministro globales. Sin embargo, mientras la literatura internacional resalta al Big Data como un motor de competitividad, los datos de la EDIT revelan que en las pymes colombianas esta tecnología aún presenta un efecto marginal modesto del 3.8% y carece de significancia estadística plena $P = 0.112$. Esta discrepancia se fundamenta en un bajo nivel de madurez analítica del tejido empresarial, en el cual la adopción de herramientas de procesamiento masivo se realiza de manera instrumental sin una integración estratégica que altere los procesos de toma de decisiones. Al carecer de una cultura de gobernanza de datos, las organizaciones acumulan registros brutos que no se transforman en conocimiento aplicable, en el que la ausencia de talento especializado y los elevados costos de implementación impiden que el análisis masivo se traduzca en progreso innovador, tal como advierten Amatta y Ali Agha (2024) sobre los obstáculos en economías en desarrollo.

Un hallazgo relevante de esta investigación es el rol de la Productividad Total de los Factores TPF,



calculada mediante el método de Levinsohn y Petrin, la cual aporta un incremento del 3.4% en la probabilidad de que la firma ejecute actividades relacionada con innovación. Este resultado valida la hipótesis de que la eficiencia operativa previa actúa como una base necesaria para la absorción digital, donde el residuo de productividad acumulado por la pyme facilita la transición hacia categorías superiores de desempeño al reducir las barreras técnicas que limitan la adopción de herramientas ciberfísicas. La evidencia sugiere que la optimización de los procesos internos permite a la organización potenciar sus recursos, en el que la PTF representa un progreso técnico y un cimiento administrativo que permite a la firma convertir los activos tecnológicos en innovaciones tangibles dentro del tejido manufacturero.

Al contrastar la heterogeneidad sectorial, se observa que industrias con mayor complejidad técnica, como la fabricación de sustancias químicas, logran una eficiencia productiva superior frente a sectores de baja intensidad tecnológica como las confecciones. Esta observación es coherente con los estudios de Chauhan, Singh y Luthra (2021), quienes enfatizan que el impacto de la Industria 4.0 está mediado por las capacidades dinámicas preexistentes de cada rama industrial, en el cual los sectores con procesos estandarizados y alta inversión en activos fijos presentan una mayor facultad de absorción para integrar sistemas ciberfísicos. La evidencia sugiere que la brecha de productividad no es únicamente un fenómeno de adquisición de hardware, el cual constituye una manifestación de la disparidad en la formación de capital humano y en la madurez de los protocolos operativos que permiten a las industrias químicas capitalizar las economías de escala derivadas de la digitalización de manera detallada.

La adaptabilidad estratégica se consolida como el factor que permite a las pymes manufactureras procesar la disrupción tecnológica en entornos de alta volatilidad operativa. Al contrastar estos hallazgos con las perspectivas de Al-Husain et al. (2025), se observa que la evolución digital en contextos emergentes requiere de un proceso de reconfiguración de las competencias internas ante las presiones del mercado, en el cual la adquisición de herramientas técnicas resulta insuficiente si la organización no desarrolla una destreza que transforme los insumos digitales en determinantes de

competitividad real. La resiliencia industrial en el escenario contemporáneo se vincula con la agilidad operativa, en el que la firma sustituye los esquemas rígidos por modelos de fabricación autónomos que facilitan la personalización de la producción sin comprometer la eficiencia residual alcanzada mediante la optimización de los procesos básicos

El enfoque planteado por Remedi-Rumi y Arzuaga-Williams (2024) refuerza la idea de que la identificación y aprovechamiento de oportunidades tecnológicas funciona como el enlace necesario entre el capital invertido y la generación de valor en las pymes. En el escenario del sector manufacturero, estas facultades facilitan que las organizaciones enfrenten perturbaciones externas mediante una gestión de datos descentralizada en el cual el cúmulo de conocimientos complejos define la velocidad de respuesta ante innovaciones disruptivas según las reflexiones de Merín-Rodrigáñez et al. (2025). El robustecimiento de tales capacidades dinámicas promueve un modelo de productividad que no depende exclusivamente del tamaño de la planta física, en el cual la gestión del conocimiento técnico redefine la eficiencia operativa al permitir una vigilancia constante de la cadena de valor sin incurrir en los esquemas rígidos de la manufactura tradicional.

4. CONCLUSIONES

El análisis empírico permite concluir que la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 ejerce una influencia diferenciada sobre el desempeño innovador de las pymes manufactureras en Colombia. Mientras que la automatización y la computación en la nube muestran una asociación recurrente con las innovaciones de proceso y organización, otras herramientas disruptivas presentan un impacto condicionado por las capacidades internas de la firma. El estudio demuestra que el vínculo entre digitalización e innovación no es automático, en el cual la configuración técnica de la planta actúa como un facilitador que requiere de una estructura administrativa flexible para materializar mejoras significativas en el catálogo de productos y servicios.

Los resultados obtenidos validan parcialmente las hipótesis planteadas en esta investigación bajo una significancia estadística del 5%. Se confirma H1, al evidenciar que el Internet de las Cosas y la

Inteligencia Artificial elevan la probabilidad de alcanzar innovaciones de producto, en el cual los coeficientes de la regresión multinomial respaldan esta relación. De igual forma, se acepta H3, en el que la Productividad Total de los Factores PTF estimada mediante el método de Levinsohn y Petrin se ratifica como un determinante relevante para que una empresa se clasifique en categorías superiores de innovación, confirmando que la eficiencia operativa previa facilita la captura de valor de los activos digitales.

Desde la perspectiva de la gestión empresarial, los hallazgos sugieren que las pymes deben priorizar la creación de una arquitectura de gobernanza de datos antes de realizar inversiones masivas en herramientas de analítica compleja. Para la política pública, los resultados indican la necesidad de diseñar programas de fomento que trasciendan la entrega de subsidios para la adquisición de hardware, en el cual el enfoque estatal debe orientarse hacia el cierre de brechas de talento humano especializado. Es necesario que los lineamientos de transformación digital incluyan incentivos para la reconfiguración de las capacidades dinámicas de las organizaciones, asegurando que la modernización del tejido productivo se sustente en una base técnica sólida y no en una adopción instrumental de corto plazo.

La principal limitación de este estudio reside en el uso de una base integrada multifuente de corte transversal, el cual impide observar la trayectoria evolutiva de las firmas a lo largo del tiempo. Al no tratarse de un panel de datos real, no es posible establecer relaciones de causalidad definitivas sobre el crecimiento de la productividad en el largo plazo. Las futuras líneas de investigación pueden orientarse hacia el análisis de microdatos longitudinales que permitan evaluar el impacto de la madurez digital sobre la supervivencia empresarial en entornos de alta incertidumbre, donde el uso de técnicas de aprendizaje supervisado podría aportar mayor precisión en la clasificación de las trayectorias de innovación del sector industrial.

5. REFERENCES

- Al-Husain, R. A., Jasim, T. A., Mathew, V., Al-Romeedy, B. S., Khairy, H. A., Mahmoud, H., . . . Alsetoohy, O. (2025). Optimizing sustainability performance through digital dynamic capabilities, green knowledge management, and green technology innovation. *Scientific Reports.*, 14(1), 1 - 21. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-025-04912-6>
- Amatta, B., & Ali Agha, M. S. (2024). Industry 4.0 Implementation Barriers for SMEs: A Proposed Decision-Support Model of the Most Appropriate Adoption Route. *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.*, February(12 - 14), 1005 - 1016. doi:<https://doi.org/10.46254/AN14.20240256>
- Chauhan, C., Singh, A., & Luthra, S. (2021). Barriers to industry 4.0 adoption and its performance implications: An empirical investigation of emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, 285. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124809>
- Chiang, A.-H., Trimi, S., & Kou, T.-C. (2024). Critical Factors for Implementing Smart Manufacturing: A Supply Chain Perspective. *Sustainability*, 16(22), 1 - 21. doi:<https://doi.org/10.3390/su16229975>
- Congreso de la República. (2004). Ley 905. Promoción del desarrollo de la micro, pequeña y mediana empresa colombiana. Bogotá, D.C., Colombia.
- DANE. (2018). Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT. Industria Manufacturera 2017-2018: Boletín técnico. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/encuesta-de-desarrollo-e-innovacion-tecnologica-edit>
- DANE. (2024). Encuesta Anual Manufacturera Anonimizada. Metodología y resultados generales. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-eam>
- DANE. (2025). Boletín Técnico Encuesta Mensual Manufacturera con Enfoque Territorial EMMET.
- Eller, R., Alford, P., Kallmünzer, A., & Peters, M. (2020). Antecedents, consequences, and challenges of small and medium-sized enterprise digitalization. *Journal of Business Research*, 112, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.03.004>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies.



- International Journal of Production Economics, 210, 15–26.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- García-Muiña, F., Medina-Salgado, M. S., González-Sánchez, R., Huertas-Valdivia, I., Ferrari, A. M., & Settembre-Blundo, D. (2021). Industry 4.0-based dynamic Social Organizational Life Cycle Assessment to target the social circular economy in manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 327, 1 – 11.
[doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129439](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129439)
- Helfat, C. E., & Raubitschek, R. S. (2018). Dynamic and integrative capabilities for profiting from innovation in digital platform-based ecosystems. *Research Policy*, 47(8), 1391–1399.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.01.019>
- Levinsohn, J., & Petrin, A. (2003). Estimating Production Functions Using Inputs to Control for Unobservables. *Review of Economics Studies*, 70, 317 – 341. <https://doi.org/10.1111/1467-937X.00246>
- Merín-Rodríguez, J., Dasí, Á., Alegre, J., & Hughes, M. (2025). Dynamic managerial capabilities for digital transformation in innovative SMEs: What are the effects on new product development performance. *Journal of Business Research*, 201, 1 – 15.
[doi:https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2025.115709](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2025.115709)
- MinTIC. (2019). Aspectos Básicos de la Industria 4.0. Bogotá, D.C., Colombia
- Montoya Peláez, M., & Aguirre Alvarez, Y. A. (2024). Robotic process automation technology applied to the management of SMES in the manufacturing and service sector: A systematic review. *Universidad & Empresa*, 27(48), 1 - 43.
[doi:https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.14237](https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.14237)
- OCDE/Eurostat. (2018). Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation. The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities. Paris, Francia: OCDE Publishing.
[doi:https://doi.org/10.1787/9789264304604-en](https://doi.org/10.1787/9789264304604-en)
- Ortiz Clavijo, L. F., Fernández Ledesma, J. D., Cadavid Nieto, S., & Gallego Duque, C. J. (2018). Computación en la nube: estudio de herramientas orientadas a la industria 4.0. *Lámpsakos*, (20), 68–75.
<https://doi.org/10.21501/21454086.2560>
- Remedi-Rumi, N., & Arzuaga-Williams, M. (2024). Capacidades dinámicas, adopción tecnológica y desempeño en PYMES industriales de Uruguay. *Revista Venezolana de Gerencia*, 29(106), 593 - 608. [doi:https://doi.org/10.52080/rvgluz.29.106.9](https://doi.org/10.52080/rvgluz.29.106.9)
- Sjödin, D., Parida, V., Kohtamäki, M., & Wincent, J. (2020). An agile co-creation process for digital servitization: A micro-service innovation approach. *Journal of Business Research*, 112, 478–491.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.01.009>
- Superintendencia de Sociedades. (2025). Pymes 2025. Bogotá, D.C., Colombia
- Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118–144.
<https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
- Warner, K. S., & Wäger, M. (2019). Building dynamic capabilities for digital transformation: An ongoing process of strategic renewal. *Long Range Planning*, 52(3), 326–349.
<https://doi.org/10.1016/j.lrp.2018.12.001>