

Adopción de la Industria 4.0 en el contexto latinoamericano: análisis de barreras en México

Adoption of Industry 4.0 in the Latin American Context: Analysis of Barriers in Mexico

Gabriel Maldonado-Gómez*

TecNM-Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, México

gmaldonado@itesa.edu.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-5921-4180>

Recepción: 18 de septiembre de 2024

Aprobación: 26 de noviembre de 2024



José-Vicente Tomás-Miquel

Universitat Politècnica de València, España

jotomi@doe.upv.es

 <https://orcid.org/0000-0002-5053-935X>

Jordi Capó Vicedo

Universitat Politècnica de València, España

jorcavi0@esp.upv.es

 <https://orcid.org/0000-0003-1642-1590>

RESUMEN

Considerando las barreras que dificultan su adopción y su impacto en el desarrollo económico y tecnológico del país, se analiza la implementación de la Industria 4.0 (I4.0) en México. El estudio examina tanto barreras internas como externas mediante un enfoque multicriterio que emplea la metodología Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC con el objetivo de identificar las dinámicas causa-efecto entre los factores involucrados. Los hallazgos evidencian que estas barreras se encuentran principalmente en aspectos regulatorios, económicos y de infraestructura, así como en limitaciones internas en el ámbito empresarial. Se concluye que esta problemática tiene implicaciones significativas tanto para la literatura académica como para empresarios y responsables de políticas públicas interesados en fomentar la transformación digital en México.

PALABRAS CLAVE: Industria 4.0, barreras, México, modelos de decisión multicriterio.

ABSTRACT

The implementation of Industry 4.0 (I4.0) in Mexico is analyzed, considering the barriers that hinder its adoption and its impact on the economic and technological development of the country. The study examines internal and external barriers through a multi-criteria approach using the Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC methodologies to identify the cause-effect dynamics between the factors involved. The findings show that these barriers are mainly found in regulatory, economic and infrastructure aspects and in internal limitations at the company level. It is concluded that these issues have significant implications both for the academic literature and for entrepreneurs and policymakers interested in fostering digital transformation in Mexico.

KEYWORDS: Industry 4.0, barriers, Mexico, multi-criteria decision making models.

INTRODUCCIÓN

La transformación digital y la adopción de la Industria 4.0 (I4.0) representan un pilar fundamental para el desarrollo económico y tecnológico global. Sin embargo, en el contexto latinoamericano, y particularmente en México, este proceso enfrenta desafíos únicos que no solo reflejan el estado actual de la digitalización industrial, sino también

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

gmaldonado@itesa.edu.mx

las particularidades socioeconómicas y culturales de la región. A pesar de los esfuerzos significativos y el potencial reconocido de la I4.0 para impulsar la innovación y la competitividad, existen barreras sustanciales que limitan su implementación efectiva.

Hasta ahora, la conversación en torno a las barreras de la I4.0 en Latinoamérica se ha limitado a identificar y discutir las barreras para la adopción, entre las que se encuentran los retos tecnológicos, la necesidad de formación y desarrollo de capacidades, las limitaciones económicas y financieras y factores contextuales más amplios como los entornos normativos y la preparación del mercado. Algunos estudios sugieren que estas barreras están obstaculizando la capacidad de las empresas para adoptar tecnologías I4.0 y, por tanto, limitando su competitividad y potencial de innovación (Matt *et al.*, 2021; De Lucas Ancillo *et al.*, 2022; Ghobakhloo *et al.*, 2022; Laskurain-Iturbe *et al.*, 2023). Sin embargo, ninguno de los estudios referidos analiza la relación existente entre las diferentes barreras identificadas, además de que no se estudia el caso concreto de México.

Este artículo aborda los vacíos de conocimiento existentes en torno a las barreras que restringen la implementación de la I4.0 en el contexto mexicano. Mediante un análisis detallado, se identifican y examinan los obstáculos tanto internos como externos, así como las dinámicas causa-efecto inherentes entre ellos. Este estudio propone una perspectiva que trasciende la visión limitada de que la incorporación de tecnologías avanzadas es una acción intrínseca de las empresas, y subraya la influencia de agentes externos en el éxito o fracaso de dicha adopción. En consecuencia, la investigación contribuye a un entendimiento integral del proceso de adopción de la I4.0 en empresas situadas en economías emergentes o en vías de desarrollo. Este enfoque sentará las bases para el diseño de estrategias dirigidas y contextualizadas que faciliten una implementación exitosa y sostenible de la I4.0.

Para abordar los vacíos identificados en el estudio, se aplicará la metodología Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC, la cual permite comprender la interrelación y las dinámicas de causa-efecto entre las barreras que limitan la adopción de la I4.0. Al identificar las barreras críticas y sus interrelaciones, se busca ofrecer información relevante para los responsables de la toma de decisiones en la industria y el gobierno, lo cual facilite el desarrollo de estrategias que impulsen una integración efectiva de la I4.0 en México. Este enfoque subraya tanto la urgencia de abordar estos desafíos de manera integral y coordinada como la oportunidad de superar estas barreras para fortalecer la competitividad y el crecimiento económico de México y, por extensión, de Latinoamérica en el contexto de la cuarta revolución industrial.

El contenido del documento se organiza de la siguiente manera. Tras esta introducción, se revisa la literatura y se establece un marco teórico centrado en las barreras de la I4.0 en México. El apartado de metodología describe la Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC para analizar la interacción entre las barreras. A continuación, se presentan y discuten los resultados. Por último, las conclusiones abordan las implicaciones teóricas y de gestión junto con las limitaciones del estudio y recomendaciones para futuras investigaciones.

1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1. I4.0 en el contexto latinoamericano. El caso de México

Los recientes hallazgos sobre la adopción de la I4.0 en Latinoamérica y el Caribe revelan desafíos significativos, pero también un gran potencial. En 2022, la región experimentó un aumento en la inversión extranjera directa, ya que alcanzó los 224 000 millones MXN gracias a un impulso en sectores como el de las tecnologías de la información o el automotriz (CEPAL, 2023). Este avance sugiere un potencial creciente para el desarrollo de capacidades relacionadas con la I4.0, apoyado por inversiones en tecnologías verdes y digitales.

Sin embargo, desafíos como la desindustrialización prematura y la adopción tardía de tecnologías avanzadas complican la integración en cadenas globales de valor, sobre todo en América Central y el Caribe, donde la falta de políticas industriales adecuadas ha frenado este proceso (Mäser, 2022). La digitalización, potenciada por la pandemia de COVID-19, emerge como una oportunidad para superar barreras tecnológicas (Amankwah-Amoah *et al.*, 2021),

aunque la integración y el comercio regional aún son insuficientes. Superar obstáculos estructurales y fortalecer las capacidades tecnológicas es crucial para capitalizar las oportunidades de la cuarta revolución industrial en la región.

La I4.0 está generando un creciente interés, en países líderes como México, Brasil o Argentina (Rodríguez-Alegre *et al.*, 2021). México, en particular, destaca por su estrategia nacional de Industria 4.0 que impulsa la transformación digital y el desarrollo tecnológico a través de iniciativas multisectoriales y la formación de capital humano especializado (Amaro-Rosales y Ortiz-Espinosa, 2023). Sus Centros de Innovación Industrial son vitales para la promoción de clústeres tecnológicos y la transferencia de conocimientos, que marcan un camino hacia la especialización regional (Feldman y Girolimo, 2021).

Pese a estos avances, persisten desafíos como la infraestructura tecnológica insuficiente en áreas como la conectividad de banda ancha de alta velocidad, vital para tecnologías como el Internet de las cosas (IoT) y la analítica de datos en tiempo real (García-Ortega *et al.*, 2021). Además, hay una brecha notable en habilidades digitales y técnicas dentro de la fuerza laboral, exacerbada por la falta de programas educativos enfocados en las competencias requeridas por la I4.0. La inversión económica también representa una barrera considerable, más aún para las pymes (pequeñas y medianas empresas), que a menudo enfrentan desafíos para asumir el alto costo de la tecnología avanzada. Por añadidura, la ausencia de un marco regulatorio claro complica la adopción de estas tecnologías (Pintor-Corona *et al.*, 2019).

En el ámbito organizacional muchas empresas mexicanas tienen culturas que pueden resistirse al cambio debido a la tradición o al escepticismo hacia las nuevas tecnologías, lo que ralentiza la adopción de prácticas innovadoras (Murillo, 2021). La integración de soluciones de I4.0 en las redes de suministro existentes también presenta desafíos, en especial cuando muchas empresas aún dependen de procesos y sistemas tradicionales (Barrandey-Chavira y Alarcón-Osuna, 2023). Externamente, factores como la competencia global, las tensiones comerciales y los cambios en políticas internacionales también influyen en la rapidez y eficacia con la que México adopta la I4.0 (García-Ortega *et al.*, 2021).

Con el fin de profundizar en el análisis de estos desafíos y obstáculos que enfrentan las empresas mexicanas en la adopción de la I4.0, y en línea con autores como Ramírez-Durán *et al.* (2021) o Sayem *et al.* (2022), se considera conveniente clasificar las barreras que impiden la implementación efectiva de las tecnologías y procesos asociados a la I4.0 en internas y externas, según su origen, ya sea en el interior o exterior de las organizaciones, respectivamente. En los siguientes apartados se profundizará en cada una de estas tipologías.

1. 2. Barreras internas a la I4.0 en el contexto mexicano

Las barreras internas son obstáculos significativos dentro de las organizaciones que dificultan la implementación efectiva de la I4.0. Aunque su naturaleza varía entre las empresas de Latinoamérica, especialmente en México, según su tamaño, cultura corporativa, estructura y sector, estas organizaciones enfrentan desafíos comunes. Las barreras abordadas en este apartado se vinculan a factores estratégicos, organizacionales, económicos y tecnológicos.

En el ámbito estratégico, la falta de compromiso de la alta dirección con la I4.0 (B01) es crítica, ya que limita la integración de nuevas tecnologías y afecta la percepción de la marca en la manufactura inteligente (Contieri *et al.*, 2022), sobre todo en países donde la industria manufacturera es un pilar económico, como en México, Brasil o Argentina. Por otra parte, la ausencia de una visión estratégica clara en las empresas mexicanas (B02) restringe su capacidad para adaptarse a los cambios que la I4.0 introduce; esto afecta su productividad y crecimiento en el contexto global (Serey *et al.*, 2023). De esta manera, es necesario que los líderes empresariales comprendan y se anticipen a los cambios que la I4.0 introduce adaptando las estrategias de operación y de negocios para aprovechar los beneficios que las innovaciones tecnológicas brindan (Yunus, 2020).

En el ámbito organizacional, la adopción de la I4.0 en Latinoamérica, y en México en particular, requiere una evolución hacia una mayor autonomía en los procesos y roles (B03), pero implica una reestructuración organizacional que permita a las industrias responder con rapidez a las demandas cambiantes del mercado (Da

Silva *et al.*, 2020). La cultura organizacional (B04) desempeña también un papel crucial, ya que influye de forma directa en la capacidad de innovación y adaptación, elementos clave para la implementación exitosa de la I4.0 (Kafetzopoulos y Katou, 2023). Por ello, es esencial promover una cultura empresarial que priorice la adaptabilidad, la innovación y la apertura al cambio. Esto requiere una transformación profunda en los modelos de negocio y operaciones para lograr mayor agilidad y capacidad de respuesta en un entorno empresarial cada vez más tecnológico y competitivo (Nafchi y Mohelská, 2020; Ghobakhloo *et al.*, 2022). Adicionalmente, la falta de habilidades específicas y programas de capacitación continua (B05) es un obstáculo clave que limita la actualización tecnológica y la competitividad (Ebekozién *et al.*, 2023). Por último, la escasez de personal capacitado en México (B06), agravada por la incapacidad de las empresas para atraer y retener talento, resalta la necesidad de una revisión educativa que integre competencias digitales y programas de actualización profesional (Fernando *et al.*, 2023).

En cuanto a las barreras económicas, las limitaciones financieras (B07) son un desafío fundamental, ya que la implementación de la I4.0 requiere inversiones significativas y muchas pymes mexicanas no cuentan con los recursos necesarios (Cordeiro *et al.*, 2024). A este hecho se suma la percepción del alto riesgo (B08) asociada a estas inversiones, lo que aumenta la incertidumbre sobre el retorno de la inversión (Marrucci *et al.*, 2023).

Por último, en el ámbito tecnológico, la limitada infraestructura tecnológica (B09) de las empresas mexicanas es otro factor crítico que frena la adopción de la I4.0 (Durán, 2022). Asimismo, la ciberseguridad (B10) se ha convertido en una preocupación creciente, ya que la digitalización y la interconexión de dispositivos aumentan los riesgos de seguridad, lo que exige una gestión rigurosa para garantizar un despliegue seguro de la I4.0 (Contieri *et al.*, 2022). La tabla 1 ofrece un resumen de las barreras internas.

TABLA 1
Barreras internas a la adopción de la I4.0 en México

Dimensión	Núm.	Barrera	Descripción
Estratégicas	B01	Falta de compromiso de la alta dirección en la I4.0	Falta de liderazgo y apoyo por parte de los altos directivos de la empresa en la implementación de la I4.0. El poco o nulo interés en la I4.0 se debe, entre otros factores, a una falta de comprensión de los beneficios de ésta
	B02	Falta de visión estratégica	La dirección de la empresa puede mostrar un interés por la I4.0, pero carece de una visión clara y estrategia para su adopción. Se mueve más por aspectos operativos que por desarrollar una planificación estratégica a largo plazo
Organizacionales	B03	Cambios organizacionales y de procesos requeridos	Dificultad de adaptación de los procesos existentes en la empresa para aprovechar las oportunidades que ofrece la I4.0
	B04	Cultura organizacional	La cultura organizacional es el conjunto de supuestos, creencias y conceptos compartidos que influyen en cómo los empleados trabajan y se comprometen con la empresa. Esta cultura asumida a lo largo de la empresa por los empleados puede actuar como barrera para la adopción de los procedimientos vinculados a la I4.0, esto es, resistencia al cambio
	B05	Falta de capacidad para formar al personal e incentivar un aprendizaje continuo	La empresa carece de capacidades de formación y desarrollo de habilidades y conocimientos en los empleados para que desempeñen sus funciones de manera efectiva en un entorno de trabajo que involucre tecnologías avanzadas
	B06	Falta de capacidad para captar y retener talentos en la empresa	Falta de capacidad de una organización para atraer y mantener a los empleados más talentosos y cualificados

TABLA 1 (continúa)
Barreras internas a la adopción de la I4.0 en México

Dimensión	Núm.	Barrera	Descripción
Económicas	B07	Limitaciones financieras	Falta de recursos económicos propios de la empresa para implementar las tecnologías de la I4.0 debido a su alto coste
	B08	Inversión de alto riesgo	La I4.0 supone altas inversiones, amortización larga e incierta, inversiones tardías, riesgo de robo, riesgo de obsolescencia de la tecnología, beneficio económico poco claro y la necesidad de tomar decisiones sobre en qué invertir y cuándo
Tecnológicas	B09	Infraestructura tecnológica de partida limitada	Nivel de digitalización y de desarrollo tecnológico de partida de la empresa muy bajo. Se encontrarán grandes dificultades para implementar y utilizar tecnologías relacionadas con la I4.0 por la reducida cultura tecnológica existente en la empresa
	B10	Miedo a la sustracción de información confidencial en formato digital	Es una preocupación importante para las empresas el compartir información en línea, especialmente la que involucra aspectos financieros y códigos secretos de comercio dentro de sus redes de suministro. Este factor depende de la empresa y de su falta de capacidad de establecer sistemas de seguridad digitales efectivos

Fuente: elaboración propia.

1. 3. Barreras externas a la I4.0 en el contexto mexicano

Las barreras externas son factores fuera del control directo de las organizaciones que dificultan la implementación de la I4.0. En específico, para el contexto de la economía mexicana estas barreras se agrupan en tres dimensiones principales: *a)* regulatorias, *b)* de infraestructuras y *c)* económicas.

En el ámbito de las barreras regulatorias, la falta de regulaciones y políticas gubernamentales adecuadas (B11) es un obstáculo clave para la implementación de la I4.0. Esta carencia crea incertidumbre entre las empresas, pues limita su capacidad de inversión y avance en la digitalización (Cortés *et al.*, 2017). Para superar este inconveniente, se sugiere que los gobiernos tomen un papel más activo al proporcionar soporte financiero y beneficios fiscales para incentivar la adopción de estas tecnologías (Sayem *et al.*, 2022). Por otra parte, la existencia de una arquitectura de referencia (B12) es vital para asegurar que las empresas cumplan con los estándares legales y normativos, así como garantizar la seguridad y fiabilidad en la adopción de la I4.0 (Rosales y Aguilar, 2022). Por ello, la carencia de este aspecto regulatorio dificulta en gran medida la implementación de una I4.0 exitosa.

En cuanto a las barreras de infraestructura, el contexto de inseguridad existente en diversas zonas de Latinoamérica, especialmente en México, limita la capacidad de sus empresas para integrar tecnologías avanzadas de fabricación debido al riesgo de sustracción (B13). Por ello, la protección tanto gubernamental como privada contra el robo de infraestructura física y digital es esencial para garantizar la seguridad y el avance tecnológico de las operaciones industriales en estas regiones (Chauhan *et al.*, 2021). Además de este aspecto, la carencia de infraestructuras adecuadas en el país (B14) se presenta también como otra barrera significativa para la adopción de la I4.0 en empresas mexicanas, lo cual frena su capacidad para integrar las nuevas tecnologías y procesos avanzados esenciales en la I4.0 (Cordeiro *et al.*, 2024). Esto abarca las deficiencias tanto en la infraestructura física como tecnológica necesarias para respaldar los sistemas ciberfísicos, el *big data* y otras tecnologías asociadas con la I4.0.

Finalmente, en el ámbito económico, las limitaciones de crédito por parte de las entidades financieras (B15) son un desafío prominente, más aún para las pequeñas y medianas empresas en México. La falta de acceso a financiamiento restringe la capacidad de estas empresas para invertir en tecnologías de I4.0, lo que puede inhibir su crecimiento y competitividad en un mercado en constante evolución tecnológica (Feldman y Girolimo, 2021) La tabla 2 presenta una síntesis de las barreras externas.

TABLA 2
Barreras externas a la adopción de la I4.0 en México

Dimensión	Núm.	Barrera	Descripción
Regulatorias	B11	Falta de incentivos gubernamentales	Falta de políticas y apoyo de los gobiernos en términos de incentivos financieros y fiscales para la adopción de las tecnologías digitales
	B12	Carencia de una arquitectura de referencia y estándares	El contexto tecnológico no dispone de una arquitectura de referencia y estándares, lo cual puede dificultar la implantación de la I4.0 en las empresas. Estos problemas suelen deberse a la falta de normas globales, puertos e interfaces de la infraestructura incompatibles y formatos de datos no normalizados
De las infraestructuras	B13	Falta de seguridad en infraestructuras y bienes industriales	Una preocupación importante para las empresas manufactureras es la posibilidad de que sus instalaciones sean allanadas y sus infraestructuras y bienes industriales sean robados. Su origen es principalmente externo, ya que las empresas suelen disponer de recursos limitados para prevenir estos incidentes, los cuales exceden sus capacidades de prevención
	B14	Carencia de infraestructuras apropiadas en el país	El país no dispone de las infraestructuras necesarias que requieren las empresas en su salto a la I4.0 como, por ejemplo conexiones a internet de alta velocidad o conexiones eléctricas sin cortes y con la potencia adecuada, entre otras
Económicas	B15	Limitaciones de crédito para las empresas por parte de las entidades financieras	Las entidades de crédito en el país no cubren las necesidades financieras de las empresas que pretenden adoptar la I4.0

Fuente: elaboración propia.

2. DESARROLLO METODOLÓGICO

Para evaluar las barreras existentes, es necesario comprender su complejidad, interconexión e interdependencia. La imprecisión e incertidumbre en las evaluaciones de expertos complican este análisis al hacer que los modelos tradicionales resulten insuficientes para entender las relaciones causales entre factores.

Este estudio se llevó a cabo bajo un paradigma mixto que combina técnicas cuantitativas y cualitativas. Por un lado, se utilizaron evaluaciones de expertos (enfoque cualitativo) y, por otro lado, los datos numéricos se utilizaron para analizar la influencia entre variables (enfoque cuantitativo). Este enfoque permite una triangulación de métodos que fortalece la validez de los resultados.

El instrumento usado para la recolección de datos cualitativos consistió en entrevistas semiestructuradas aplicadas a expertos seleccionados, mientras que el análisis cuantitativo se realizó con el modelo multicriterio Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC, que permitió evaluar las barreras en la adopción de la I4.0.

En este contexto, los modelos de decisión multicriterio (MCDM) como DEMATEL, ISM y MICMAC han demostrado ser eficaces para abordar la interdependencia entre diversos factores. Wu y Lee (2007) sugieren integrar DEMATEL con la teoría de conjuntos difusos para reflejar mejor las percepciones de los expertos.

La combinación de estos métodos, conocidos como Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC (Feng *et al.*, 2023), proporciona un marco robusto para analizar las relaciones causales complejas entre barreras. Este enfoque ayuda a identificar las interdependencias y dinámicas de influencia dentro de un sistema y supera las limitaciones de los modelos lineales. El método DEMATEL es esencial para entender la complejidad de las relaciones causales, ya que cuantifica la influencia mutua entre factores (Gabus y Fontela, 1972). Sin embargo, para abordar la ambigüedad en las evaluaciones, se incorpora la teoría de conjuntos difusos de Zadeh (1965), dando lugar a Fuzzy DEMATEL.

Esta integración permite una representación más precisa de las complejidades en las valoraciones. El método ISM (Modelado Estructural Interpretativo) profundiza en la jerarquización de las barreras, pues muestra las conexiones directas e indirectas entre factores (Warfield, 1974), mientras que, identificando los más importantes, MICMAC evalúa la influencia y dependencia de los obstáculos (Duperrin y Godet, 1973). El enfoque integrado Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC ha demostrado su eficacia en estudios que requieren un análisis riguroso de interacciones causales complejas, ya que facilita la toma de decisiones estratégicas y la formulación de soluciones para superar desafíos (Feng *et al.*, 2023). La figura 1 ilustra el procedimiento híbrido utilizado en este estudio.

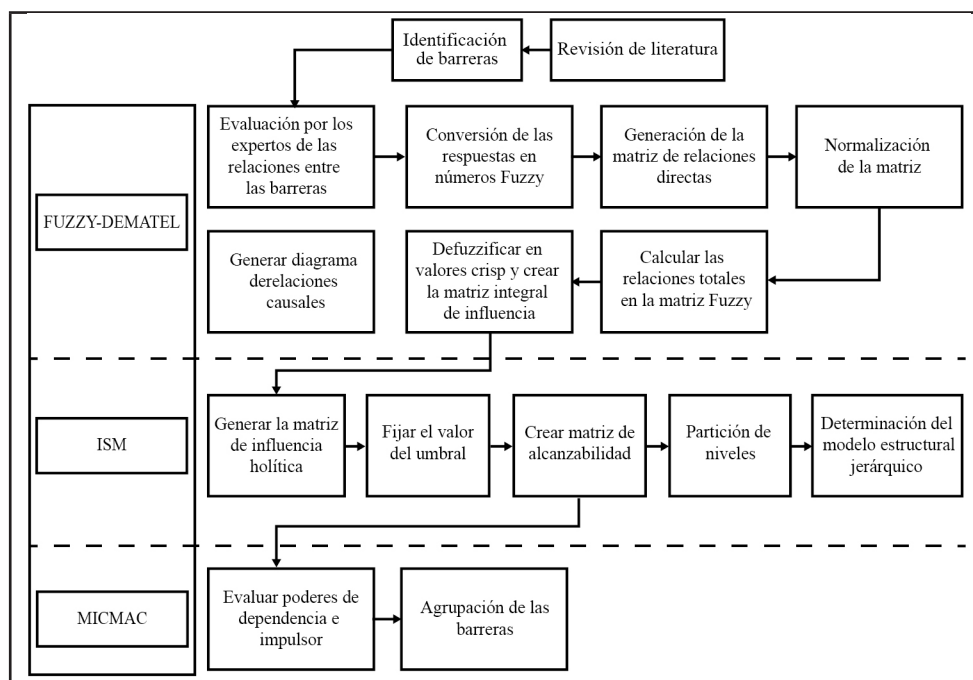


FIGURA 1
 Representación del procedimiento híbrido combinando los métodos (Fuzzy DEMATEL, ISM y MICMAC)
 Fuente: elaboración propia.

2. 1. El procedimiento híbrido Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC

Como se muestra en la figura 1, el paso previo a la aplicación del procedimiento híbrido Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC consistió en una exhaustiva revisión de la literatura, centrada en los factores clave para la adopción de la I4.0 con el fin de identificar las barreras presentes en el contexto mexicano. Los resultados se exponen en la sección 1 de este artículo dedicada a la revisión de la literatura.

Las barreras identificadas constituyen el punto de partida para la aplicación de la metodología Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC, que se desarrolla en 14 pasos. A continuación, se detalla cada uno.

2. 1. 1 Evaluación de las relaciones entre las barreras

El procedimiento Fuzzy DEMATEL se inicia con la recogida de información de expertos sobre las relaciones entre las barreras. Los expertos juegan un papel primordial en la metodología aplicada, ya que su conocimiento profundo del contexto específico de la I4.0 permite identificar y evaluar con precisión las conexiones causales entre las barreras. Estos expertos deben ser seleccionados cuidadosamente por su experiencia en la materia para

asegurar que sus opiniones sean tanto relevantes como representativas. Con el propósito de establecer el modelo de relaciones entre las 15 barreras recopiladas, se elabora una matriz inicial de 15×15 para cada experto que participa en la evaluación de las barreras. En estas matrices se registran las respuestas de cada uno siguiendo la codificación proporcionada en la tabla 3. Así, cada elemento de la matriz k refleja la influencia que el experto k considera que la barrera de cada fila i tiene sobre la barrera de cada columna j .

TABLA 3
Escala empleada por los expertos

Código	Descripción
1	No influye
2	Influencia muy baja
3	Baja influencia
4	Influencia alta
5	Influencia muy alta

Fuente: elaboración propia.

2. 1. 2. Convertir las respuestas en números fuzzy

La influencia de cada elemento de una fila sobre cada elemento de una columna de las matrices generadas puede expresarse mediante un número difuso. Por lo tanto, las matrices proporcionadas por los expertos se recodifican con la escala difusa de cinco puntos, según se muestra en la tabla 4 (Wu *et al.*, 2015).

TABLA 4
Escala Fuzzy utilizada en el modelo

Código	Descripción	Bajo	Medio	Alto
1	No influye	0	0	0.25
2	Influencia muy baja	0	0.25	0.5
3	Baja influencia	0.25	0.5	0.75
4	Influencia alta	0.5	0.75	1
5	Influencia muy alta	0.75	1	1

Fuente: Wu *et al.*, 2015.

2. 1. 3. Generar la matriz de relaciones directas

A continuación, se utiliza la media aritmética de todas las opiniones de los expertos para generar la matriz de relación directa.

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \tilde{Z}_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{Z}_{1n} & \dots & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

2. 1. 4. Normalizar la matriz de relaciones directas

La matriz normalizada \tilde{X} se obtiene desarrollando la siguiente ecuación:

$$\tilde{X} = [\tilde{X}_{ij}]_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \tag{2}$$

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{\tilde{Z}_{ij}}{r} = \left(\frac{l_{ij}}{r}, \frac{m_{ij}}{r}, \frac{u_{ij}}{r} \right) \tag{3}$$

Donde:

$$r = \text{MAX}_{i,j} \left\{ \text{MAX}_i \sum_{j=1}^n u_{ij}, \text{MAX}_j \sum_{i=1}^n u_{ij} \right\} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \tag{4}$$

2. 1. 5. Calcular las relaciones totales de la matriz fuzzy \tilde{T}

En este paso, la matriz se calcula considerando la siguiente fórmula:

$$\tilde{T} = [\tilde{t}_{ij}]_{n \times n} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \tag{5}$$

$$\tilde{T} = \lim_{k \rightarrow +\infty} (\tilde{x}^1 \oplus \tilde{x}^2 \oplus \dots \oplus \tilde{x}^k) \tag{6}$$

Si cada elemento de la matriz difusa es expresado como $\tilde{t}_{ij} = (l''_{ij}, m''_{ij}, u''_{ij})$, ésta se calcula como sigue:

$$[l''_{ij}] = x_l \times (I - x_l)^{-1} \tag{7}$$

$$[m''_{ij}] = x_m \times (I - x_m)^{-1} \tag{8}$$

$$[u''_{ij}] = x_u \times (I - x_u)^{-1} \tag{9}$$

2. 1. 6. Defuzzificar en valores crisp o reales

El método que propone Opricovic y Tzeng (2003) para convertir datos difusos en puntuaciones crisp se utiliza para obtener valores *crisp* de la matriz integral de influencia (matriz T). Los pasos son los siguientes:

$$l_{ij}^n = \frac{l_{ij}^t - \text{MIN} l_{ij}^t}{\Delta_{min}^{max}} \tag{10}$$

$$m_{ij}^n = \frac{(m_{ij}^t - \text{min} l_{ij}^t)}{\Delta_{min}^{max}} \tag{11}$$

$$u_{ij}^n = \frac{(u_{ij}^t - \text{min} l_{ij}^t)}{\Delta_{min}^{max}} \tag{12}$$

De modo que:

$$\Delta_{min}^{max} = \text{MAX} u_{ij}^t - \text{MIN} l_{ij}^t \tag{13}$$

A continuación, se utilizan las dos ecuaciones siguientes para calcular los límites superior e inferior de los valores normalizados:

$$l_{ij}^s = m_{ij}^n / (1 + m_{ij}^n - l_{ij}^n) \quad (14)$$

$$u_{ij}^s = u_{ij}^n / (1 + u_{ij}^n - l_{ij}^n) \quad (15)$$

Finalmente, las siguientes fórmulas permiten obtener los valores crisp totales normalizados:

$$T = [T_{ij}]_{n \times n} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (16)$$

$$t_{ij} = \frac{[l_{ij}^s (1 - l_{ij}^s) + u_{ij}^s \times u_{ij}^s]}{[1 - l_{ij}^s + u_{ij}^s]} \quad (17)$$

2.1.7. Obtención del resultado final y creación del diagrama de relaciones causales

El siguiente paso se aplica para averiguar la suma de cada fila y cada columna de la matriz de influencia obtenida en el paso anterior. La suma de filas (D) y columnas (R) se obtiene del siguiente modo:

$$D = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (18)$$

$$R = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (19)$$

Los valores “D + R” y “D – R” de cada barrera pueden calcularse y representarse mediante el diagrama de relaciones causales. Se interpretan de la siguiente manera. El vector horizontal “D + R” indica el nivel de importancia de cada barrera en el conjunto del sistema. Esencialmente, “D + R” refleja el impacto de una barrera en todo el sistema, así como la influencia de otras barreras en esta barrera concreta. Por otra parte, “D – R” representa la medida en que una barrera influye en el sistema. En términos generales, un valor “D – R” positivo indica una variable causal, mientras que un valor “D – R” negativo significa un efecto.

2.1.8. Obtención de la matriz de influencia holística

Tras el desarrollo del método Fuzzy DEMATEL, la investigación avanza hacia la aplicación del procedimiento de modelado estructural interpretativo (ISM). En esta fase, la matriz de influencia holística H se obtiene a partir de la matriz integral de influencia T y la matriz identidad I con la siguiente fórmula:

$$H = T + I = [h_{ij}]_{n \times n} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (20)$$

2.1.9. Fijación del valor umbral y cálculo de la matriz de alcanzabilidad

En este paso del procedimiento, se pide a los expertos que fijen un valor umbral λ para determinar la presencia o ausencia de relación entre pares de elementos de la matriz H . Posteriormente, se calcula la matriz de alcanzabilidad S

que indica si un elemento puede alcanzar a otro directa o indirectamente en función del valor umbral λ definido por los expertos para los elementos de la matriz de influencia holística H . Esto es clave para identificar las relaciones subyacentes entre variables y para simplificar la matriz de influencia global. El procedimiento de esta etapa se basa en las siguientes ecuaciones:

$$S = [S_{ij}]_{n \times n} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (21)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} > \Lambda \\ 0, & h_{ij} \leq \Lambda \end{cases} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (22)$$

2.1.10. Determinación del modelo estructural jerárquico para las barreras

A partir de la matriz de alcanzabilidad S , se identifican para cada barrera el conjunto de salida $P(ai)$, el conjunto de entrada $T(ai)$ y el conjunto de intersección $Q(ai) = P(ai) \cap T(ai)$. Si $Q(ai)$ es igual a $P(ai)$, la barrera en cuestión se considera una barrera de primer nivel. Tras esta determinación, se eliminan las barreras de los conjuntos y se repite este proceso para organizar categóricamente todas las barreras en una estructura jerárquica.

2.1.11. Evaluación de la dependencia y poder impulsor y agrupación de las barreras

Por último, cada barrera se evalúa en función de su dependencia y su poder impulsor mediante el análisis MICMAC. El poder impulsor (PI) refleja el nivel de influencia que una barrera específica tiene sobre otra, mientras que el poder de dependencia (PD) muestra hasta qué punto un factor está influido por otros factores. A partir de estos criterios y de la matriz de alcanzabilidad S , las barreras se clasifican en cuatro cuadrantes: autónomas, dependientes, de enlace e independientes, lo que ayuda a comprender mejor cómo gestionar o enfocar las intervenciones para superar las barreras. La PI y la PD se calculan de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Jiang *et al.*, 2019):

$$PI_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad i \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (23)$$

$$PD_j = \sum_{i=1}^n S_{ij} \quad j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (24)$$

3. RESULTADOS

Una vez identificadas las barreras a través de la revisión de la literatura, la primera etapa del procedimiento Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC consistió en recopilar las respuestas de los diferentes expertos. Se seleccionaron un total de 15 expertos dentro del contexto académico y profesional mexicano con más de 10 años de experiencia en áreas clave como la transformación digital, la gestión empresarial o las políticas públicas de las tecnologías avanzadas de fabricación. A cada experto se le pidió que evaluara las relaciones entre las diferentes barreras identificadas en las tablas 1 y 2 de acuerdo con el patrón mostrado en la tabla 3. A modo de ilustración, la tabla 5 muestra la respuesta obtenida de uno de los expertos entrevistados.

Para el desarrollo de los pasos 2, 3 y 4 del procedimiento, las 15 respuestas de los expertos se transformaron en números difusos. Tras ello, se calculó la media aritmética de las mismas y se normalizó la matriz resultante, con lo que se obtuvo así la matriz normalizada de relaciones directas difusa \tilde{X} . Por último, los pasos 5 y 6 permitieron obtener la matriz integral de influencia T a partir del cálculo y la desfuzzificación de la matriz \tilde{X} . La matriz T refleja mediante valores crisp, el grado en el que cada barrera es afectada por otras (tabla 6).

TABLA 5
Respuestas de los expertos

	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B01	0	5	5	5	5	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1
B02	5	0	5	5	5	5	2	3	4	2	1	1	1	1	1
B03	3	4	0	5	5	5	3	2	3	2	1	1	1	1	1
B04	5	4	5	0	5	5	4	3	3	1	1	1	1	1	1
B05	3	5	3	5	0	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1
B06	3	3	4	3	5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B07	4	1	5	1	5	5	0	5	5	1	1	1	1	1	4
B08	5	1	1	1	1	1	4	0	4	3	1	1	1	1	1
B09	4	4	4	3	1	5	1	5	0	5	1	1	1	1	1
B10	1	1	4	5	1	1	1	5	3	0	1	1	1	1	1
B11	5	4	3	4	4	4	5	5	4	4	0	1	3	3	5
B12	1	1	3	1	1	1	1	3	5	3	1	0	1	1	1
B13	1	1	1	1	1	1	1	4	1	5	1	1	0	1	1
B14	4	3	4	3	1	1	1	4	5	3	1	5	4	0	1
B15	5	4	5	4	4	3	5	5	4	1	1	1	1	1	0

Fuente: elaboración propia.

TABLA 6
Matriz integral de influencia

	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B01	0.054	0.118	0.123	0.122	0.124	0.127	0.035	0.11	0.042	0.024	0.009	0.009	0.01	0.009	0.011
B02	0.129	0.056	0.132	0.128	0.129	0.135	0.054	0.105	0.098	0.047	0.01	0.011	0.011	0.01	0.014
B03	0.091	0.104	0.058	0.122	0.124	0.128	0.067	0.064	0.077	0.042	0.01	0.01	0.01	0.01	0.014
B04	0.129	0.11	0.132	0.059	0.131	0.137	0.087	0.088	0.098	0.029	0.01	0.011	0.011	0.01	0.016
B05	0.083	0.111	0.086	0.114	0.048	0.119	0.044	0.038	0.035	0.018	0.009	0.009	0.009	0.009	0.011
B06	0.074	0.075	0.095	0.078	0.109	0.041	0.023	0.03	0.027	0.016	0.008	0.008	0.009	0.008	0.009
B07	0.113	0.057	0.127	0.059	0.123	0.129	0.032	0.118	0.111	0.029	0.01	0.01	0.011	0.01	0.07
B08	0.104	0.031	0.04	0.033	0.033	0.038	0.074	0.034	0.084	0.057	0.008	0.008	0.008	0.008	0.013
B09	0.106	0.098	0.109	0.089	0.053	0.12	0.031	0.116	0.038	0.096	0.009	0.01	0.01	0.01	0.012
B10	0.039	0.032	0.091	0.102	0.033	0.038	0.026	0.102	0.069	0.017	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009
B11	0.151	0.124	0.123	0.13	0.13	0.136	0.117	0.146	0.119	0.095	0.009	0.017	0.053	0.05	0.092
B12	0.029	0.025	0.067	0.028	0.022	0.028	0.017	0.067	0.096	0.059	0.008	0.004	0.008	0.007	0.008
B13	0.019	0.013	0.02	0.02	0.013	0.015	0.014	0.08	0.02	0.087	0.007	0.007	0.003	0.007	0.007
B14	0.106	0.082	0.109	0.087	0.047	0.055	0.031	0.11	0.116	0.073	0.01	0.082	0.067	0.006	0.012
B15	0.137	0.114	0.138	0.117	0.121	0.11	0.109	0.128	0.107	0.032	0.01	0.011	0.012	0.011	0.014

Fuente: elaboración propia.

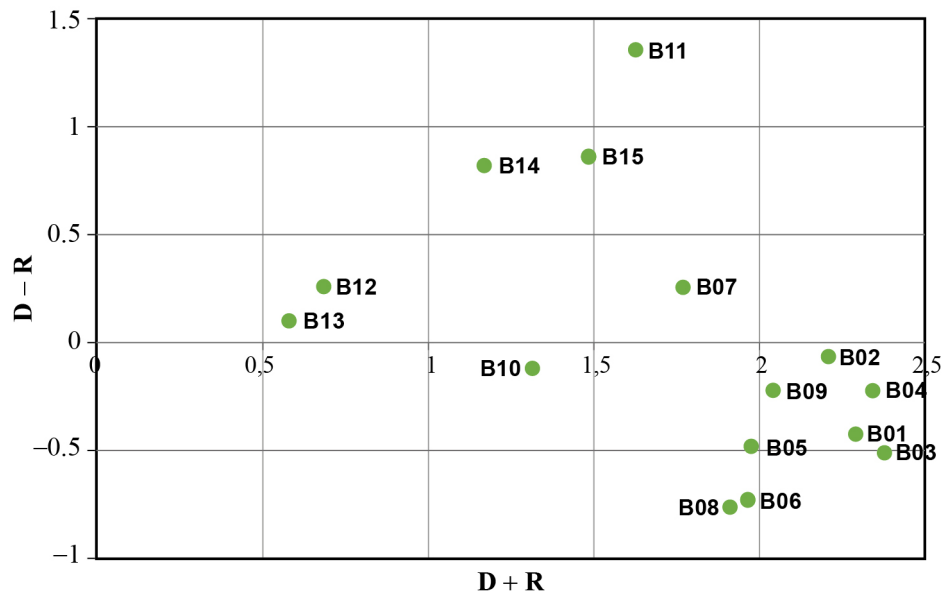
Posteriormente, en el paso 7 se calcularon los valores de “D”, “R”, “D + R” y “D – R” de la matriz integral de influencia para obtener el modelo causa-efecto que conforma el principal resultado del método Fuzzy DEMATEL (tabla 7).

TABLA 7
Resultados del modelo causa-efecto

Barrera	R	D	D + R	D - R
B01	1.365	0.929	2.295	-0.436
B02	1.148	1.068	2.217	-0.08
B03	1.449	0.932	2.38	-0.517
B04	1.287	1.059	2.346	-0.229
B05	1.239	0.741	1.98	-0.498
B06	1.356	0.611	1.967	-0.745
B07	0.762	1.008	1.77	0.245
B08	1.338	0.573	1.911	-0.765
B09	1.137	0.906	2.043	-0.231
B10	0.72	0.591	1.311	-0.129
B11	0.135	1.492	1.627	1.357
B12	0.214	0.471	0.685	0.257
B13	0.241	0.332	0.573	0.091
B14	0.174	0.994	1.168	0.82
B15	0.313	1.172	1.485	0.858

Fuente: elaboración propia.

Los valores “D + R” y “D - R” fueron usados para la representación gráfica del diagrama causa-efecto vinculado a las barreras existentes a la adopción de la I4.0 en México (gráfica 1).



GRÁFICA 1
Diagrama causa-efecto de las barreras para la implementación de la I4.0

Fuente: elaboración propia.

3. 1. Resultados del procedimiento ISM

Continuando con el desarrollo del método, se presentan los resultados del procedimiento ISM obtenidos con el desarrollo de los pasos 8, 9 y 10 de la metodología. La tabla 8 muestra los resultados de la matriz de influencia holística H derivada de la matriz integral de influencia T . Engloba la evaluación integral del impacto entre las barreras identificadas para la adopción de la I4.0 cuantificando las influencias directas e indirectas; a su vez, proporciona una comprensión matizada de la interacción entre estas barreras y su impacto colectivo en los esfuerzos para la implementación de las tecnologías I4.0.

TABLA 8
Matriz de influencia holística

	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B01	1.054	0.118	0.123	0.122	0.124	0.127	0.035	0.11	0.042	0.024	0.009	0.009	0.01	0.009	0.011
B02	0.129	1.056	0.132	0.128	0.129	0.135	0.054	0.105	0.098	0.047	0.01	0.011	0.011	0.01	0.014
B03	0.091	0.104	1.058	0.122	0.124	0.128	0.067	0.064	0.077	0.042	0.01	0.01	0.01	0.01	0.014
B04	0.129	0.11	0.132	1.059	0.131	0.137	0.087	0.088	0.098	0.029	0.01	0.011	0.011	0.01	0.016
B05	0.083	0.111	0.086	0.114	1.048	0.119	0.044	0.038	0.035	0.018	0.009	0.009	0.009	0.009	0.011
B06	0.074	0.075	0.095	0.078	0.109	1.041	0.023	0.03	0.027	0.016	0.008	0.008	0.009	0.008	0.009
B07	0.113	0.057	0.127	0.059	0.123	0.129	1.032	0.118	0.111	0.029	0.01	0.01	0.011	0.01	0.07
B08	0.104	0.031	0.04	0.033	0.033	0.038	0.074	1.034	0.084	0.057	0.008	0.008	0.008	0.008	0.013
B09	0.106	0.098	0.109	0.089	0.053	0.12	0.031	0.116	1.038	0.096	0.009	0.01	0.01	0.01	0.012
B10	0.039	0.032	0.091	0.102	0.033	0.038	0.026	0.102	0.069	1.017	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009
B11	0.151	0.124	0.123	0.13	0.13	0.136	0.117	0.146	0.119	0.095	1.009	0.017	0.053	0.05	0.092
B12	0.029	0.025	0.067	0.028	0.022	0.028	0.017	0.067	0.096	0.059	0.008	1.004	0.008	0.007	0.008
B13	0.019	0.013	0.02	0.02	0.013	0.015	0.014	0.08	0.02	0.087	0.007	0.007	1.003	0.007	0.007
B14	0.106	0.082	0.109	0.087	0.047	0.055	0.031	0.11	0.116	0.073	0.01	0.082	0.067	1.006	0.012
B15	0.137	0.114	0.138	0.117	0.121	0.11	0.109	0.128	0.107	0.032	0.01	0.011	0.012	0.011	1.014

Fuente: elaboración propia.

Para generar la matriz de alcanzabilidad, es necesario establecer un valor de umbral significativo basado en la matriz de influencia holística. Este umbral fue determinado a partir del consenso de los expertos involucrados en nuestro estudio. Se presentaron a los expertos diferentes valores de umbral alternativos y se realizaron pruebas de sensibilidad para evaluar el impacto de cada uno en nuestro análisis. Los expertos evaluaron cada opción tomando en cuenta cómo el umbral afectaba la consistencia, robustez e interpretabilidad de la estructura de la red resultante. En particular, analizaron si cada umbral distinguía de manera adecuada las relaciones significativas entre los factores sin sobrestimar ni subestimar las conexiones. Tras una cuidadosa evaluación y las pruebas de sensibilidad, los expertos acordaron que un umbral de 0.161 proporcionaba la estructura de red más consistente para nuestro análisis de las barreras para la adopción de la Industria 4.0 en México. La tabla 9 muestra la matriz de alcanzabilidad derivada después de aplicar este criterio específico.

En la etapa final del procedimiento ISM se establece la estructura jerárquica de las barreras, las cuales se alinean con lo señalado en el paso 10 de la metodología. Este paso determina la posición por niveles de cada barrera y ofrece un marco estratégico para abordarlas sistemáticamente (tabla 10).

Para mejorar la comprensión de estos hallazgos, los datos del cuadro anterior se convirtieron en una representación visual para ilustrar la estructura jerárquica de las barreras a la adopción de la I4.0 en las empresas mexicanas (figura 2).

TABLA 9
Matriz de alcanzabilidad

	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15	PI
B01	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7
B02	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	8
B03	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
B04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	9
B05	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
B06	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
B07	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	7
B08	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
B09	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	8
B10	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	4
B11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	12
B12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2
B13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2
B14	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	6
B15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	10
PD	10	8	12	10	9	10	4	10	8	4	1	1	1	1	2	

Fuente: elaboración propia.

TABLA 10
Partición por niveles del modelo ISM

	$P(ai)$	$T(ai)$	$Q(ai)$	Nivel
B01	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B08	B01, B02, B03, B04, B07, B08, B09, B11, B14, B15	B01, B02, B03, B04, B08	2
B02	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B08, B09	B01, B02, B03, B04, B05, B09, B11, B15	B01, B02, B03, B04, B05, B09	2
B03	B01, B02, B03, B04, B05, B06	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B09, B10, B11, B14, B15	B01, B02, B03, B04, B05, B06	1
B04	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B09	B01, B02, B03, B04, B05, B09, B10, B11, B14, B15	B01, B02, B03, B04, B05, B09	4
B05	B02, B03, B04, B05, B06	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B11, B15	B02, B03, B04, B05, B06	1
B06	B03, B05, B06	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B09, B11, B15	B03, B05, B06	1
B07	B01, B03, B05, B06, B07, B08, B09	B04, B07, B11, B15	B07	3
B08	B01, B08	B01, B02, B04, B07, B08, B09, B10, B11, B14, B15	B01, B08	1
B09	B01, B02, B03, B04, B06, B08, B09, B10	B02, B04, B07, B09, B11, B12, B14, B15	B02, B04, B09	3
B10	B03, B04, B08, B10	B09, B10, B11, B13	B10	2
B11	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10, B11, B15	B11	B11	5
B12	B09, B12	B12	B12	3
B13	B10, B13	B13	B13	3
B14	B01, B03, B04, B08, B09, B14	B14	B14	3
B15	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B09, B15	B11, B15	B15	4

Fuente: elaboración propia.

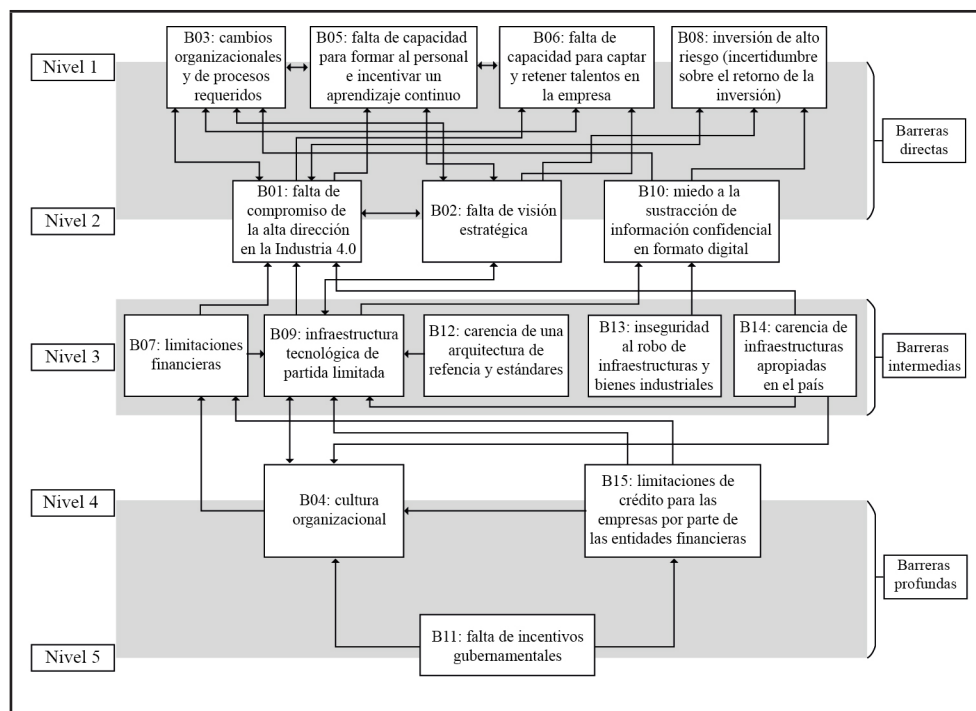


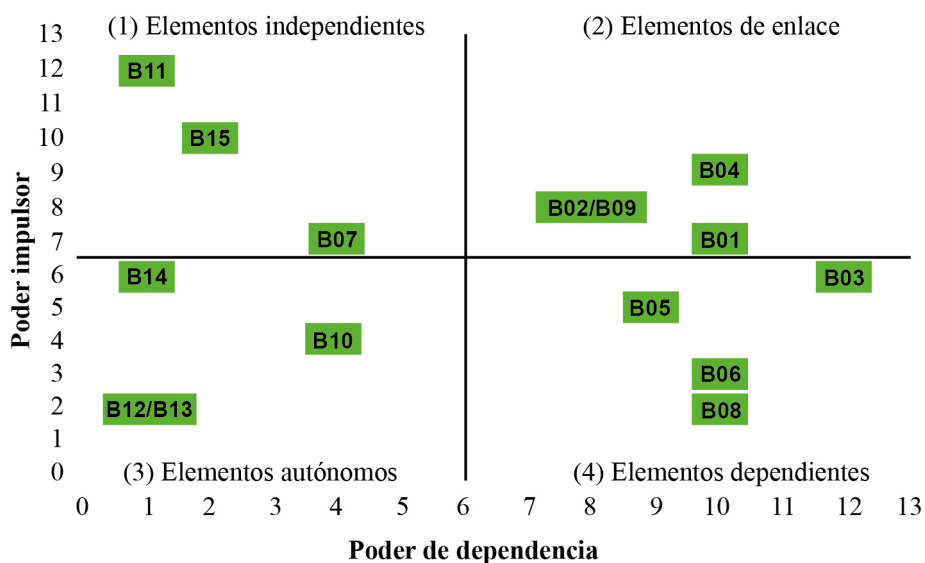
FIGURA 2

Estructura jerárquica de las barreras para la implementación de la I4.0 en México

Fuente: elaboración propia.

3. 2. Resultados del procedimiento MICMAC

Como término a todo el desarrollo del procedimiento, los valores PD y PI derivados de la matriz de alcanzabilidad *S* facilitan la identificación de los poderes de dependencia e impulsor que permiten desarrollar el análisis MICMAC. A partir de estos datos, las barreras se clasificaron en los cuatro cuadrantes descritos en la metodología. La gráfica 2 ofrece una representación significativa de las agrupaciones derivadas de este análisis.



GRÁFICA 2

Agrupación de las barreras para la adopción de la I4.0 según el análisis MICMAC

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

La transición hacia la I4.0 en México enfrenta barreras que pueden clasificarse en tres niveles: barreras profundas, barreras intermedias y barreras directas. Cada una de estas categorías tiene una influencia significativa en las otras, puesto que crea una red compleja de limitaciones que deben ser superadas para lograr una implementación exitosa. A continuación, a partir de los modelos obtenidos (figura 2 y gráfica 2), se detalla cómo estas barreras interactúan y afectan a la adopción de la I4.0 por parte de las empresas mexicanas.

Las barreras profundas, las más relevantes, se sitúan en los niveles 4 y 5 del modelo jerárquico ISM (figura 2) y en los cuadrantes 1 y 2 del modelo MICMAC (gráfica 2). Entre las más destacadas están la falta de incentivos gubernamentales (B11) en el nivel 5 y las limitaciones de crédito (B15) y la cultura organizacional (B04) en el nivel 4. Estas barreras, vinculadas a factores internos y externos, generan un impacto significativo en las demás. La falta de incentivos gubernamentales (B11), la más significativa, desincentiva la inversión en tecnologías I4.0 al influir en las limitaciones financieras (B15) y en el desarrollo de una cultura organizacional (B04) poco orientada a la innovación (Luthra *et al.*, 2020). Además, las limitaciones de crédito (B15) también tienen una influencia negativa sobre la cultura organizativa (B04), puesto que crean un entorno empresarial aún menos favorable para la innovación. Por otra parte, las limitaciones de crédito (B15) reducen las capacidades financieras de las empresas (B07), lo que afecta su capacidad para invertir en tecnología e infraestructura (B09). De acuerdo con el modelo jerárquico ISM, este problema se ve intensificado por una cultura organizacional poco receptiva a la innovación (B04), que dificulta la digitalización y el desarrollo de infraestructuras tecnológicas (Nafchi y Mohelská, 2020).

Las barreras intermedias, en el nivel 3 del modelo jerárquico ISM (figura 2) y en los cuadrantes 2 y 3 del modelo MICMAC o en posiciones cercanas a ellos (gráfica 2), son el nexo entre las profundas y las directas, influenciadas por las primeras y, a su vez, afectando a las segundas. Estas barreras incluyen las limitaciones financieras (B07), la infraestructura de partida limitada (B09), la falta de una arquitectura de referencia (B12), la inseguridad en el robo de bienes industriales (B13) y la carencia de infraestructuras apropiadas en el país (B14). La infraestructura limitada (B09) está influenciada por barreras profundas como la cultura organizacional (B04) y las limitaciones de crédito (B15), así como por otras barreras intermedias, como las limitaciones financieras (B07) y la falta de estándares (B12). Esta última barrera dificulta la interoperabilidad y la eficiencia, especialmente en aplicaciones críticas, que limita la expansión de la infraestructura tecnológica (B09) (Albouq *et al.*, 2022). La carencia de infraestructuras nacionales (B14) obstaculiza la expansión de la infraestructura tecnológica (B09) y afecta tanto a la cultura organizacional (B04), a nivel inferior, como al compromiso de la alta dirección (B01) y, a nivel superior, como una barrera primordial para la adopción de la I4.0 (Moktadir *et al.*, 2018). Por otro lado, la inseguridad al robo de bienes industriales (B13), no alimentada por ninguna variable profunda, incrementa el temor al robo de información confidencial (B10), lo que puede desalentar la adopción de tecnologías digitales (Qiu *et al.*, 2023).

Para concluir, las barreras directas son aquellas que afectan de manera inmediata a la adopción y el desarrollo de la I4.0 dentro de una empresa, y son las más visibles y más fáciles de detectar. Están posicionadas en los niveles 1 y 2 del modelo ISM (figura 2) y en el cuadrante 4 del modelo MICMAC o en posiciones cercanas a él (gráfica 2). Sin embargo, no por ello deben ser consideradas prioritarias, ya que están directamente influenciadas por otras barreras de niveles intermedios y profundos. Entre ellas, se encuentran la falta de compromiso de la alta dirección (B01), la falta de visión estratégica (B02), los cambios organizacionales necesarios (B03), la incapacidad para formar al personal (B05) y retener talento (B06), el alto riesgo de inversión (B08) y el miedo a la sustracción de información confidencial (B10).

Iniciando por las barreras ubicadas en el nivel 2, la necesidad de un compromiso de la alta dirección (B01) es clave para el éxito de la adopción de la I4.0 (Horváth y Szabó, 2019). Esta barrera es influenciada por barreras de nivel inferior como las limitaciones financieras (B07), la infraestructura limitada de partida (B09) y

la carencia de infraestructuras adecuadas en el país (B14) y por otras de nivel superior como la percepción de alto riesgo (B08) y los cambios organizacionales necesarios (B03). Además, barreras del mismo nivel, como la falta de visión estratégica (B02), también tienen una influencia al dificultar la planificación de inversiones en tecnologías I4.0. Según el modelo ISM obtenido, esta falta de visión es consecuencia también de múltiples barreras como la infraestructura tecnológica limitada (B09), la falta de compromiso de la alta dirección (B01), los cambios organizacionales y de gestión requeridos para adoptar la I4.0 (B03) y la falta de capacidad para formar al personal (B05) en un ciclo recíproco de influencia. El miedo a la sustracción de información confidencial (B10), última barrera de nivel 2 del modelo, es una preocupación clave en países como México. El robo de datos digitales puede retrasar la adopción de la I4.0, lo que exige múltiples capas de protección tecnológica (Al-Harrasi *et al.*, 2023), aunque no siempre garantizan una defensa completa. Este obstáculo destaca las condiciones que enfrentan las empresas mexicanas, agravadas por la inseguridad al robo de infraestructuras y bienes industriales (B13).

Para finalizar y centrando la atención en el nivel 1 del modelo, se encuentran las barreras más visibles para los responsables empresariales. Sin embargo, su ubicación en los niveles más superficiales, junto con la influencia que reciben de otras barreras de niveles 1 y 2 (en muchos casos recíproca), disminuye su impacto global y capacidad explicativa. Los cambios organizacionales y de procesos necesarios para adoptar la I4.0 (B03) y la falta de capacidad para formar al personal (B05) son aspectos decisivos que limitan la implementación de estas tecnologías (Engelmann y Schwabe, 2018; Orzes *et al.*, 2020). De manera similar, la falta de capacidad para captar y retener talento especializado (B06) es crítica, ya que la alta competencia por expertos en tecnologías I4.0, junto con la falta de incentivos adecuados, dificulta la retención de personal cualificado. Esto subraya la necesidad de enfoques más efectivos para el desarrollo del talento (Whysall *et al.*, 2019). Finalmente, la última barrera de nivel 1 es la percepción de la I4.0 como una inversión de alto riesgo debido a la incertidumbre sobre el retorno de inversión (B08), lo que desanima a las empresas a invertir y se convierte en un obstáculo determinante incluso en economías desarrolladas (Bosman *et al.*, 2020).

PROSPECTIVA

Esta investigación tiene varias implicaciones notables. Desde la perspectiva teórica, amplía la literatura sobre la adopción de la I4.0 en economías emergentes al proporcionar una metodología innovadora y un análisis detallado de las barreras en el contexto mexicano. En el sector empresarial, los resultados ayudan a las empresas mexicanas a identificar y abordar barreras específicas para mejorar su competitividad e innovación. Para los responsables de políticas públicas e industriales ofrece recomendaciones prácticas, ya que destaca la necesidad de incentivos gubernamentales y económicos, mejoras en infraestructuras tecnológicas y de seguridad, un marco regulatorio claro y el fortalecimiento de la cultura organizacional para apoyar la transformación digital en México.

Como en cualquier estudio, se reconocen algunas limitaciones. El enfoque en México puede limitar la generalización de los resultados a otros países con contextos socioeconómicos y culturales diferentes. Además, aunque la metodología Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC es sólida, su complejidad dificulta su aplicación sin apoyo experto. También, pueden existir otras barreras no identificadas que influyen en la adopción de la I4.0, por lo que futuras investigaciones deberían considerar más factores.

Esta investigación abre varias líneas para estudios futuros y extender el análisis a otros países de Latinoamérica para comparar los hallazgos. También, es primordial profundizar en barreras específicas como la ciberseguridad y la falta de infraestructura y analizar cómo las políticas públicas y programas gubernamentales influyen en la adopción de la I4.0 a partir de la identificación de los más efectivos. Además, sería relevante explorar programas educativos que preparen mejor a la fuerza laboral para la I4.0 y realizar estudios sectoriales para identificar barreras y oportunidades específicas. Estas líneas buscan profundizar en la aplicación de la I4.0 en Latinoamérica para así motivar el desarrollo tecnológico en la región.

CONCLUSIONES

Este estudio se ha centrado en identificar y analizar las barreras que limitan la implementación de la I4.0 en México. Usando la metodología Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC, se examinaron barreras internas y externas y se establecieron sus interrelaciones y dinámicas causa-efecto. Este enfoque ayudó a identificar factores clave para los responsables de la toma de decisiones que faciliten la creación de estrategias para superar estos obstáculos y avanzar hacia una integración efectiva de la I4.0 en las empresas mexicanas.

Los resultados obtenidos son significativos. Revelan un conjunto de barreras originadas no solo dentro de las empresas, sino también profundamente arraigadas en factores externos, como regulaciones, economía e infraestructura. En específico, los resultados muestran que la red causal que dificulta la adopción de la I4.0 en México se basa sobre todo en factores externos y, en menor medida, en factores internos (B04, B07 y B09). A medida que se avanza en el modelo jerárquico, desde los niveles más relevantes hasta los menos, se transita de barreras vinculadas en su mayoría a factores externos hacia otras más visibles dentro de la empresa, aunque estas últimas no reflejan el verdadero origen del problema.

Este estudio se diferencia de trabajos anteriores en varios aspectos clave. Primero, adopta un enfoque holístico. Mientras que estudios anteriores identifican barreras para la implementación de la I4.0 en Latinoamérica (De Lucas Ancillo *et al.*, 2022), este artículo es el primero en analizar específicamente la relación entre estas barreras en México y su interacción. Al integrar metodologías que mapean estas dinámicas, se mejora el marco conceptual y se facilita la creación de estrategias que aborden varias barreras en conjunto.

En segundo lugar, se aplicó un modelo multicriterio basado en las metodologías Fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC, que va más allá de identificar barreras, como en estudios previos (Ghobakhloo *et al.*, 2022), al ofrecer también una evaluación de su influencia relativa y las dinámicas de causa-efecto. Este enfoque permite una comprensión más profunda de la adopción de la I4.0 en México, lo cual revela la interconexión entre barreras internas y externas.

Además, a diferencia de estudios que abordan la región en general (Laskurain-Iturbe *et al.*, 2023), esta investigación se centra en México, por lo que ofrece un análisis contextualizado. También destaca la perspectiva de agentes externos, como el gobierno y las instituciones educativas, subrayando su influencia en el éxito o fracaso de la adopción de la I4.0, aspecto que no ha sido suficientemente abordado en la literatura. Por ejemplo, Matt *et al.* (2021) examinan los retos tecnológicos, pero no consideran en profundidad la influencia de factores externos en su análisis. Del mismo modo, Cordeiro *et al.* (2023) se enfocan en los factores que impulsan la adopción de la I4.0 en organizaciones de Latinoamérica a partir de la influencia de normas subjetivas y el contexto tecnológico.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos la ayuda financiera prestada para proyecto PID2021-126516NB-I00 financiado por MCIN / AEI / 10.13039/501100011033 / FEDER, UE y a los árbitros que participaron de forma anónima en la revisión de este artículo y contribuyeron a la mejora del escrito.

REFERENCIAS

- Albouq, S. S., Sen, A. A. A., Almashf, N., Yamin, M., Alshantiti, A., & Bahboub, N.M. (2022). A survey of interoperability challenges and solutions for dealing with them in IOT environment. *IEEE Access*, 10, 36416-36428.
- Al-Harrasi, A., Shaikh, A. K., & Al-Badi, A. (2023). Towards protecting organisations' data by preventing data theft by malicious insiders. *International Journal of Organizational Analysis*, 31(3), 875-888.
- Amankwah-Amoah, J., Khan, Z., Wood, G., & Knight, G. (2021). COVID-19 and digitalization: the great acceleration. *Journal of Business Research*, 136, 602-611.

- Amaro-Rosales, M. y Ortiz-Espinoza, M. de los Á. (2023). Planes y programas públicos para el fomento de la Industria 4.0 en México. *Entretextos*, 15(39), 1-17.
- Barrandey-Chavira, J. A. y Alarcón-Osuna, M. A. (2023). Rentabilidad y progreso tecnológico en el sector manufacturero mexicano: análisis de datos en panel, 2004-2019. *Análisis Económico*, 38(97), 93-110.
- Bosman, L., Hartman, N., & Sutherland, J. (2020). How manufacturing firm characteristics can influence decision making for investing in Industry 4.0 technologies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1117-1141.
- 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.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2023). *La inversión extranjera directa en América Latina y el Caribe*. LC /PUB.2023/8-P/Rev.1. Santiago: CEPAL.
- Contieri, P. G. S., Anholon, R., & De Santa-Eulalia, L. A. (2022). Industry 4.0 enabling technologies in manufacturing: implementation priorities and difficulties in an emerging country. *Technology Analysis and Strategic Management*, 34(5), 489-503.
- Cordeiro, L., Oliveira, R., & Lima, F. (2024). Financial constraints and Industry 4.0 implementation in Brazilian firms. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 80-90.
- Cordeiro, R. F., Reis, L. P., & Fernandes, J. M. (2023). A study on the barriers that impact the adoption of Industry 4.0 in the context of Brazilian companies. *TQM Journal*, 36(1), 361-384.
- Cortés, C. B. Y., Landeta, J. M. I., Chacón, J. G. B., Pereyra, F. A., & Osorio, M. L. (2017). El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras. *Conciencia tecnológica*, 54.
- Da Silva, V. L., Kovaleski, J. L., Pagani, R. N., Silva, J. D. M., & Corsi, A. (2020). Implementation of Industry 4.0 concept in companies: empirical evidences. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(4), 325-342.
- De Lucas Ancillo, A., Gavrila Gavrila, S., Fernández del Castillo Díez, J. R., Corro Beseler, J. (2022). LATAM and Spanish SME barriers to Industry 4.0. *Academia Revista Latinoamericana de Administración*, 35(2), 204-222.
- Duperrin, J. C., & Godet, M. (1973). Méthode de hiérarchisation des éléments d'un système: essai de prospective du système de l'énergie nucléaire dans son contexte sociétal. *Rapport Economique du CEA*, 45-51.
- Durán, J. (2022). *Industria 4.0, clave para el desarrollo de América Latina*. Cirion Technologies.
- Ebekozien, A., Aigbavboa, C. O., Adekunle, S. A., Aliu, J., & Thwala, W. D. (2023). Training needs of built environment professionals: the role of fourth industrial revolution. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- Engelmann, A., & Schwabe, G. (2018). Enabling workers to enter Industry 4.0: A layered mobile learning architecture. In *Proceedings of the 51st Hawaii Int. Conference on System Science*.
- Feldman, P. J., & Girolimo, U. (2021). La Industria 4.0 en perspectiva latinoamericana: limitaciones, oportunidades y desafíos para su desarrollo. *Revista Perspectivas de Políticas Públicas*, 10(20), 459-491.
- Feng, J., Zhang, H., Li, X., & Liu, Q. (2023). *Factors affecting the green behavior of employees: A hybrid fuzzy DEMATEL-ISM-MICMAC approach*. Buildings.
- Fernando, S., Ali, M., & Pereira, V. (2023). High-risk investments in Industry 4.0: An analysis of return uncertainties. *Technological Forecasting and Social Change*, 184, 121967.
- Gabus, A., & Fontela, E. (1972). *World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL*. Battelle Geneva Research Centre.

- García-Ortega, B., Lopez-Navarro, M. A., & Galan-Cubillo, J. (2021). Top management support in the implementation of industry 4.0 and business digitization: the case of companies in the main European stock indices. *IEEE Access*, *9*, 139994-140007.
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A., & Amran, A. (2022). Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: a systematic review and transformation roadmap. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *33*(6), 1029-1058.
- Horváth, D., & Szabó, R.Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, *146*, 119-132.
- Jiang, L., Ge, L., Chen, Z., & Tan, J. (2019). Investigating the adoption barriers to Industry 4.0 technologies in farmer producer organizations. *International Journal of Global Business and Competitiveness*, *15*(1), 45-56.
- Kafetzopoulos, D., & Katou, A.A. (2023). Expanding strategic flexibility through organizational culture, industry 4.0 and market orientation. *International Journal of Productivity and Performance Management*.
- Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landin, G., Landeta-Manzano, B., & Jimenez-Redal, R. (2023). Assessing the uptake of Industry 4.0 technologies: barriers to their adoption and impact on quality management aspects. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *40*(10), 2420-2442.
- Luthra, S., Kumar, A., Zavadskas, E. K., Mangla, S. K., & Garza-Reyes, J. A. (2020). I4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: an analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. *International Journal of Production Research*, *58*(5), 1505-1521.
- Marrucci, A., Rialti, R., & Balzano, M. (2023). Exploring paths underlying Industry 4.0 implementation in manufacturing SMEs: a fuzzy-set qualitative comparative analysis. *Management Decision*. <https://doi.org/10.1108/MD-05-2022-0644>.
- Masera, D. (2022). La industrialización en América Latina y el Caribe: retos y oportunidades. *Industrial Analytics Platform*. Viena: Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.
- Matt, D. T., Modrák, V., & Zsifkovits, H. (2021). Industry 4.0 for SMEs: challenges, opportunities and requirements. In *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements*. Palgrave Macmillan.
- Moktadir, M. A., Ali, S. M., Kusi-Sarpong, S., & Shaikh, M. A. A. (2018). Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. *Process Safety and Environmental Protection*, *117*, 730-741.
- Murillo, J. (2021). *Resistencia al cambio, el eterno desafío*. Forbes México.
- Nafchi, M. Z., & Mohelská, H. (2020). Organizational culture as an indication of readiness to implement industry 4.0. *Information*, *11*(3).
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2003). Defuzzification within a multicriteria decision model. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, *11*(5), 635-652.
- Orzes, G., Poklemba, R., & Towner, W. T. (2020). Implementing industry 4.0 in smes: A focus group study on organizational requirements. In *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements* (pp. 251-277). Palgrave Macmillan.
- Pintor-Corona, M., Gonzalez-Monzon, A. L., & Mendoza-Santiago, E. (2019). Industria 4.0 en México, la administración inteligente en sistemas productivos. *Revista de Tecnologías de la Información y Comunicaciones*, *25*-27.
- Qiu, Z., Wang, S., Hou, Y., & Xu, S. (2023). What drives infrastructure participants to adopt digital technology: a nexus of internal and external factors. *Sustainability*, *15*, 16229.

- Ramírez-Durán, V. J., Berges, I., & Illarramendi, A. (2021). Towards the implementation of Industry 4.0: A methodology-based approach oriented to the customer life cycle. *Computers in Industry*, 126.
- Rodríguez-Alegre, L. R., Trujillo-Valdiviezo, G., Egusquiza-Rodríguez, M. J., & López-Padilla, R. P. (2021). Revolución industrial 4.0: La brecha digital en Latinoamérica. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 6(11), 147-162.
- Rosales, M. A. y Aguilar, R. (2022). Logística 4.0: transformaciones tecnológicas y del trabajo en México, en *Oportunidades y retos para la adopción de la Industria 4.0 en México*. Plaza y Valdés, UNAM.
- Sayem, A., Biswas, P. K., Khan, M. M. A., Romoli, L., & Dalle Mura, M. (2022). Critical Barriers to Industry 4.0 Adoption in Manufacturing Organizations and Their Mitigation Strategies. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6).
- Serey, J., Alfaro, M., Fuertes, G., Vargas, M., Ternero, R., Duran, C., Sabattin, J., & Gutierrez, S. (2023). Framework for the strategic adoption of Industry 4.0: A focus on intelligent systems. *Processes*, 11(10), 2973.
- Warfield, J. N. (1974). *Structuring complex systems*. Ohio: Battelle Memorial Institute.
- Wu, H. Y., Tzeng, G. H., & Chen, Y. H. (2015). A fuzzy MCDM approach for evaluating banking performance based on balanced scorecard. *Expert Systems With Applications*, 36(6), 10135-10147.
- Wu, W. W., & Lee, Y. T. (2007). Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method. *Expert systems with applications*, 32(2), 499-507.
- Whysall, Z., Owtram, M., & Brittain, S. (2019). The new talent management challenges of Industry 4.0. *Journal of Management Development*, 38(2), 118-129.
- Yunus, E. N. (2020). The mark of industry 4.0: how managers respond to key revolutionary changes. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(5), 1213-1231.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

CC BY-NC-ND

Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/24636>

Cómo citar el artículo:

Maldonado-Gómez, G., Tomás-Miquel, J.-V. y Capó Vicedo, J. (2025). Adopción de la Industria 4.0 en el contexto latinoamericano: análisis de barreras en México. *CIENCIA ergo-sum*, 32. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a34>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a34>



Licencia Creative Commons Atribución-Non-Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Gabriel Maldonado-Gómez: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

José-Vicente Tomás-Miquel: conceptualización, metodología, validación, supervisión, redacción-revisión y edición.

Jordi Capó Vicedo: conceptualización, supervisión, validación y redacción-revisión y edición.