UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de un modelo de madurez para implementación de Manufactura Digital en empresas manufactureras del municipio de Aldana

David Alejandro Zambrano Estupiñán

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas, Departamento de Ingeniería de la Organización
Medellín, Colombia
2025

Diseño de un modelo de madurez para implementación de Manufactura Digital en empresas manufactureras del municipio de Aldana

David Alejandro Zambrano Estupiñán

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Industrial

Director (a):

Ph.D. Alexander Alberto Correa Espinal

Línea de Investigación:

Ingeniería y sistemas de producción

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2025

(Dedicatoria o lema)

“La innovación es lo que distingue a un líder de los demás”.

Steve Jobs

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional de Colombia por haber brindado no solo su formación académica de excelencia, sino también la posibilidad de llevar a cabo gracias al apoyo y respaldo de la Dirección Nacional de Posgrados. Extiendo un agradecimiento especial al profesor Alexander Alberto Correa Espinal, por su guía rigurosa, su orientación oportuna y su compromiso con el desarrollo investigativo. A los empresarios Daniel Alberto Espitia y Diego Fernando Quitiaquez, por su valiosa disposición por permitir que este trabajo tuviera una aplicación real en el territorio. A mi hijo Gabriel Santiago Zambrano, quien representa mi mayor motivación y la razón profunda de cada paso en este camino. A mis padres, por ser el soporte constante en mi vida, por su ejemplo y su amor incondicional. Y a Diana C. por su compañía silenciosa pero fundamental, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. A todos, gracias por ser parte esencial de este logro.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y validar un modelo de madurez para evaluar el nivel de preparación y adopción de tecnologías de Manufactura Digital en pequeñas y medianas empresas (PYMES) del sector agroalimentario en el municipio de Aldana, Nariño. Se empleó su enfoque metodológico mixto, que integró una revisión sistemática de literatura y un diagnóstico territorial del contexto local, identificando barreras como la baja infraestructura tecnológica, escasa formación en competencias digitales y limitaciones de inversión.

El modelo diseñado se estructuró en siete dimensiones clave: estrategia y liderazgo, infraestructura tecnológica, digitalización de procesos, personas o empleados, inversión y financiamiento, gestión de datos y ciberseguridad e innovación y adaptabilidad. Para cada dimensión se definieron niveles de madurez y criterios de evaluación ponderados.

La validación del modelo se realizó mediante la aplicación de un cuestionario estructurado con escala tipo Likert, a dos empresas agroalimentarias representativas de la región: Lácteos Fresco e Industrias Muchitaa S.A.S. Los resultados permitieron clasificar el nivel de dimensión de madurez de cada dimensión y detectar áreas críticas. Lácteos Fresco obtuvo un nivel de madurez global intermedia (3.7), mientras que Industrias Muchitaa S.A.S. se ubicó en un nivel inicial (2.2). Como valor agregado, se propuso un plan estratégico personalizado para cada empresa, orientado a superar sus principales limitaciones y avanzar en la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0.

Este modelo puede ser replicado y ajustado para su aplicación en otras PYMES del sector, como herramienta de diagnóstico y planificación digital.

Palabras clave: Modelo de madurez, Manufactura digital, Industria 4.0, Transformación digital, PYMES agroalimentarias, diagnóstico empresarial, Nariño.

Abstract

A Contextual Maturity Model for Digital Transformation in Agro-Industrial Manufacturing SMEs: The Case of Aldana, Colombia

This research aims to design and validate a maturity model to asses the level of preparedness and adoption of Digital Manufacturing technologies in small and medium-sized enterprises (SMEs) within the agri-food sector of Aldana, Nariño, Colombia. A mixed-methods approach was employed, combining a systematic literature review with a local contextual analysis, identifying barriers such as limited technological infrastructure, low digital skills, and restricted investment capacity.

The resulting model includes seven key dimensions: strategy and leadership, technological infrastructure, process digitalization, human capital, investment and financing, data management and cybersecurity, and innovation and adaptability. Each dimension was defined with specific maturity levels and weighted evaluation criteria.

Validation of the model was conducted through the application of a structured questionnaire using a Likert scale in two cases studies: Lácteos Fresco and Industrias Muchitaa S.A.S. Results allowed for the classification of each dimension and revealed contrasting levels of maturity between the companies. Lácteos Fresco reached an intermediate maturity level (3.7), while Industrias Muchitaa S.A.S. was classified at an initial level (2.2). Based on the findings, a strategic improvement plan was formulated for each company to guide their digital transformation process.

The proposed maturity model serves not only as a diagnostic tool but also as a roadmap for SMEs in similar contexts seeking to implement Industry 4.0 technologies and enhance their competitiveness.

Keywords: Maturity model, digital manufacturing, Industry 4.0, digital transformation, SMEs agri-food sector, Nariño.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **VI**

Lista de figuras ..... **X**

Lista de tablas ..... **XII**

Introducción **1**

1. Estado del arte **3**
1.1 Metodología de búsqueda 4
1.2 Formulación de preguntas de investigación 5
1.3 Criterios de Búsqueda 7
1.4 Definición de criterios de inclusión y exclusión 9
1.5 Ejecución del SLR 9
1.5.1 Evaluación de los artículos 10
1.6 Análisis de datos 15
1.6.1 Enfoques metodológicos para la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES 16
1.6.2 Obstáculos y barreras de implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES 19
1.6.3 Análisis de los sectores industriales y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0 21
1.7 Resultados 24
1.8 Oportunidades de investigación 28

2. Definición del constructo de la investigación **30**
2.1 Industria 4.0 33
2.1.1 Transformación digital 35
2.2 Madurez digital 35
2.2.1 Factores de Madurez digital 35
2.3 Modelos de Madurez 36
2.3.1 Niveles de madurez 37
2.3.2 Dimensiones 37
2.3.3 Modelos de madurez en la literatura 38
2.4 Análisis de los Modelos de Madurez enfocados a PYMES 39
2.4.1 ¿Cómo se construyeron los modelos de madurez (MM)? 40
2.4.2 ¿Cuáles son sus aplicaciones prácticas? 44

3. Diseño del modelo de madurez **46**
3.1 Enfoque metodológico 47

3.1.1 Caracterización de la pequeña y mediana empresa del departamento de Nariño 49
3.1.2 Análisis de los modelos de madurez identificados 57
3.1.3 Empresa Tipo 63
3.2 Definición de dimensiones 64
3.2.1 Revisión de las dimensiones en modelos previos. 64
3.2.2 Integración del contexto local y definición final de dimensiones 68
3.2.3 Dimensiones del Modelo de Madurez 69
3.2.4 Niveles de Madurez 72
3.3 Criterios de evaluación 74
3.3.1 Estructura de los criterios 75
3.3.2 Instrumento de recolección de datos: Cuestionario de evaluación 78
3.4 Modelo de madurez 79

4. Validación del modelo 81
4.1 Contexto Geográfico 82
4.1.1 Caracterización del sector económico aldanense 83
4.2 Selección de Empresas 84
4.2.1 Industrias Muchitaa S.A.S. 85
4.2.2 Lácteos Fresco 88
4.3 Aplicación del Modelo 92
4.3.1 Instrumento Aplicado 92
4.3.2 Proceso de recolección de datos. 92
4.3.3 Procesamiento y análisis de resultados 92
4.4 Ejecución y Análisis de los datos obtenidos 93
4.4.1 Validación en Industrias Muchitaa S.A.S. 93
4.4.2 Validación en Lácteos Fresco 102
4.5 Plan estratégico 109
4.5.1 Plan estratégico de Transformación digital para Industrias Muchitaa S.A.S. 109
4.5.2 Plan estratégico de Transformación digital para Lácteos Fresco 110

5. Conclusiones 112
5.1 Conclusiones 112
5.2 Recomendaciones 113

A. Anexo: Valoración de artículos 114

B. Anexo: Número de sociedades renovadas en la jurisdicción según tamaño empresa 2020-2021 130

C. Anexo: Estudio Económico (Cámara de Comercio 2023) 131

D. Anexo: Instrumento de Validación 132

Bibliografía 134

Lista de figuras

Pág.

Figura 1.*Resumen capítulo estado del arte.* 4
Figura 2. *Etapas de refinamiento de la literatura* 5
Figura 3. *Resumen de la ejecución de la RSL* 12
Figura 4. *Relación de palabras clave en los artículos de interés* 13
Figura 5. *Relación de palabras clave orden cronológico.* 14
Figura 6. *Relación de citaciones entre países de la implementación* 14
Figura 7. *Implementación de tecnologías de la Manufactura Digital en las PYMES – Autores.* 15
Figura 8. *Gráfico Modelos de Enfoques metodológicos.* 25
Figura 9. *Gráfico Barreras de implementación investigadas* 26
Figura 10. *Gráfico Sectores Industriales explorados* 27
Figura 11. *Relación de oportunidad de investigación* 28
Figura 12. *Desarrollo del capítulo 2.* 30
Figura 13. *Árbol de problemas* 32
Figura 14. *Pilares de la Industria 4.0* 34
Figura 15. *Metodología para el Diseño del Modelo de Madurez.* 47
Figura 16. *Enfoque metodológico* 48
Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.* 55
Figura 18. *Desafíos que enfrentan las PYMES en la adopción de I4.0* 56
Figura 19. *Visualización del Modelo de Madurez* 80
Figura 20. *Metodología del capítulo.* 81
Figura 21. *Mapa, Aldana, Nariño* 82
Figura 22. *Logo Industrias Muchitaa S.A.S.* 86
Figura 23. *Proceso Productivo Industrias Muchitaa S.A.S.* 87
Figura 24. *Lácteos Fresco Imagen corporativa* 88
Figura 25. *Organigrama Lácteos Fresco* 89
Figura 26. *Proceso productivo Lácteos Fresco* 91
Figura 27. *Madurez General de la empresa.* 94
Figura 28. *Estrategia y Liderazgo Industrias Muchitaa S.A.S.* 95
Figura 29. *Infraestructura Tecnológica de Industrias Muchitaa S.A.S.* 96
Figura 30. *Nivel de digitalización de procesos en Industrias Muchitaa S.A.S.* 97
Figura 31. *Personas o Empleados de Industrias Muchitaa S.A.S.* 98
Figura 32. *Inversión y Financiamiento de Industrias Muchitaa S.A.S.* 99
Figura 33. *Gestión de datos de Industrias Muchitaa S.A.S.* 100

Figura 34. *Innovación y Adaptabilidad de Industrias Muchitaa S.A.S.* 101
Figura 35. *Madurez General de Lácteos Fresco*..... 103
Figura 36. Estrategia y Liderazgo Lácteos Fresco..... 104
Figura 37. *Infraestructura tecnológica de Lácteos Fresco*..... 105
Figura 38. *Nivel de digitalización de procesos en Lácteos Fresco.*..... 106
Figura 39. *Personas o empleados de Lácteos Fresco*..... 107
Figura 40. *Inversión y financiamiento de Lácteos Fresco*..... 107
Figura 41. *Gestión de datos y ciberseguridad de Lácteos Fresco.* 108
Figura 42. Innovación y adaptabilidad de Lácteos Fresco..... 109

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. *Resultados Iteración 1* 6
Tabla 2. *Resultados Iteración 2* 7
Tabla 3. *Resultados Iteración 3.* 8
Tabla 4. *Búsqueda de documentos aplicables a la investigación.* 10
Tabla 5.*Criterios de evaluación de contenido de los artículos relacionados.* 10
Tabla 6. *Categorías definidas de los enfoques metodológicos encontrados* 17
Tabla 7. *Representación de autores según categorías enfoques metodológicos.* 18
Tabla 8. *Categorías definidas de los obstáculos y barreras de implementación.* 20
Tabla 9. *Representación autores según categorías de los obstáculos y barreras de implementación.* 21
Tabla 10. *Categorías definidas de los sectores industriales y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0* 22
Tabla 11. *Representación autores según categorías sectores industriales.* 23
Tabla 12. *Línea de tiempo con los principales acontecimientos en el campo de los modelos de madurez* 38
Tabla 13. *Modelos de Madurez* 40
Tabla 14. *Sector de aplicación modelos de madurez (MM)* 44
Tabla 15. *Distribución por sectores empresas Nariño, 2023* 51
Tabla 16. *Empresas PYMES agroalimentarias de Nariño* 52
Tabla 17. *Perfil de las PYMES agroalimentarias de Nariño* 52
Tabla 18. *Empresas PYMES agroindustriales Nariño – medios de trabajo.* 53
Tabla 19. *Comparación de modelos* 60
Tabla 20. *Frecuencia de dimensiones en modelos previos* 65
Tabla 21. *Fases de consolidación de dimensiones* 69
Tabla 22. *Definición de dimensiones* 71
Tabla 23. *Relación entre las dimensiones seleccionadas y barreras identificadas en el contexto.* 71
Tabla 24. *Niveles de madurez* 72
Tabla 25. *Niveles de madurez por dimensión* 73
Tabla 26. *Pesos ítems* 75
Tabla 27. *Semáforo de madurez* 78
Tabla 28. *Ejemplo cuestionario* 79
Tabla 29. *Nivel de madurez Industrias Muchitaa S.A.S.* 94
Tabla 30. *Nivel de Madurez de Lácteos Fresco* 103

Introducción

La Industria 4.0, también conocida como Manufactura Digital, representa una revolución tecnológica caracterizada por la integración de innovaciones como el Big Data, la Inteligencia Artificial, los gemelos digitales y el análisis de datos avanzados (Abdulnour et al., 2022a; da Silva et al., 2022; Menon & Shah, 2020). Estas tecnologías permiten la captura de datos en tiempo real y una toma de decisiones más eficiente, lo cual ha transformado profundamente los procesos productivos, optimizando desde la gestión de materias primas hasta la entrega del producto final (Elhusseiny & Crispim, 2021; Masood & Sonntag, 2020; Ricci et al., 2021). Las organizaciones que han logrado adoptar estas herramientas reportan mejoras en productividad, eficiencia y capacidad de adaptación a mercados cada vez más exigentes (Galindo, 2019).

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías ha estado liderada principalmente por grandes empresas. Las pequeñas y medianas empresas (PYMES), especialmente en países en desarrollo, enfrentan barreras significativas para su implementación, tales como limitaciones de infraestructura, recursos financieros escasos y falta de formación técnica (Kent et al., 2019; Kumar et al., 2023; Orzes et al., 2018; Rauch et al., 2019).

En Colombia, las PYMES, constituyen aproximadamente el 90% del tejido empresarial, generan cerca del 79% del empleo y aportan un 40% al PIB nacional (Confecámaras, 2021). No obstante, su nivel de digitalización es bajo y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0 ha sido incipiente. En el departamento de Nariño, con más de 27.000 empresas registradas, sólo el 4% corresponden a pequeñas y medianas empresas, muchas de ellas ubicadas en sectores agroindustriales con bajos niveles de competitividad y transformación digital (Cámara de Comercio de Pasto, 2022; Competitividad, 2023).

En este contexto, se hace necesario diseñar herramientas que permitan evaluar el grado de preparación de estas empresas para incorporar tecnologías digitales. Los modelos de madurez se presentan como instrumentos clave en este propósito, ya que permiten diagnosticar el estado actual de una organización en diferentes dimensiones y establecer una hoja de ruta clara hacia la transformación digital (Mittal et al., 2018).

El objetivo de esta investigación es diseñar y validar un modelo de madurez que permita evaluar el nivel de preparación y adopción de tecnologías de Manufactura Digital en las PYMES del sector agroalimentario en el municipio de Aldana, Nariño. El modelo busca adaptarse a las realidades y desafíos específicos del territorio, integrando tanto la teoría existente como un diagnóstico contextual.

Para ello, se adopta una metodología mixta, que combina una revisión sistemática de literatura con un análisis cualitativo de las condiciones locales de las PYMES. A partir de esta información, se construye un modelo estructurado en dimensiones clave, niveles de madurez e indicadores específicos. Posteriormente, el modelo es validado empíricamente en empresas representativas de la región mediante la aplicación de un instrumento diseñado para tal fin.

Esta tesis propone no solo una herramienta de diagnóstico, sino también un aporte práctico para la toma de decisiones estratégicas en el camino hacia la transformación digital de las PYMES agroalimentarias de Nariño.

1. Estado del arte

La transformación digital ha interrumpido en el mundo empresarial, generando una revolución sin precedentes en la forma en que las organizaciones operan y compiten en el mercado global. En este contexto, la implementación de la Industria 4.0 se ha convertido en un tema central de estudio, especialmente en el ámbito de las pequeñas y medianas empresas (PYMES), que representan un pilar fundamental de la economía mundial.

El presente capítulo presenta un análisis exhaustivo del estado del arte en relación con la implementación de la Industria 4.0 en las PYMES. Para ello, se siguió un proceso riguroso que incluyó la formulación de preguntas de investigación, la definición de criterios de búsqueda y la evaluación sistemática de literatura académica relevante.

En primer lugar, se establecieron preguntas de investigación específicas que sirvieron como guía para dirigir la búsqueda y análisis. Estos cuestionamientos representan un punto de interés clave, tales como los enfoques metodológicos utilizados en los estudios, las barreras de implementación enfrentadas por las PYMES en la adopción de la Industria 4.0 y los sectores industriales que han sido objeto de mayor atención.

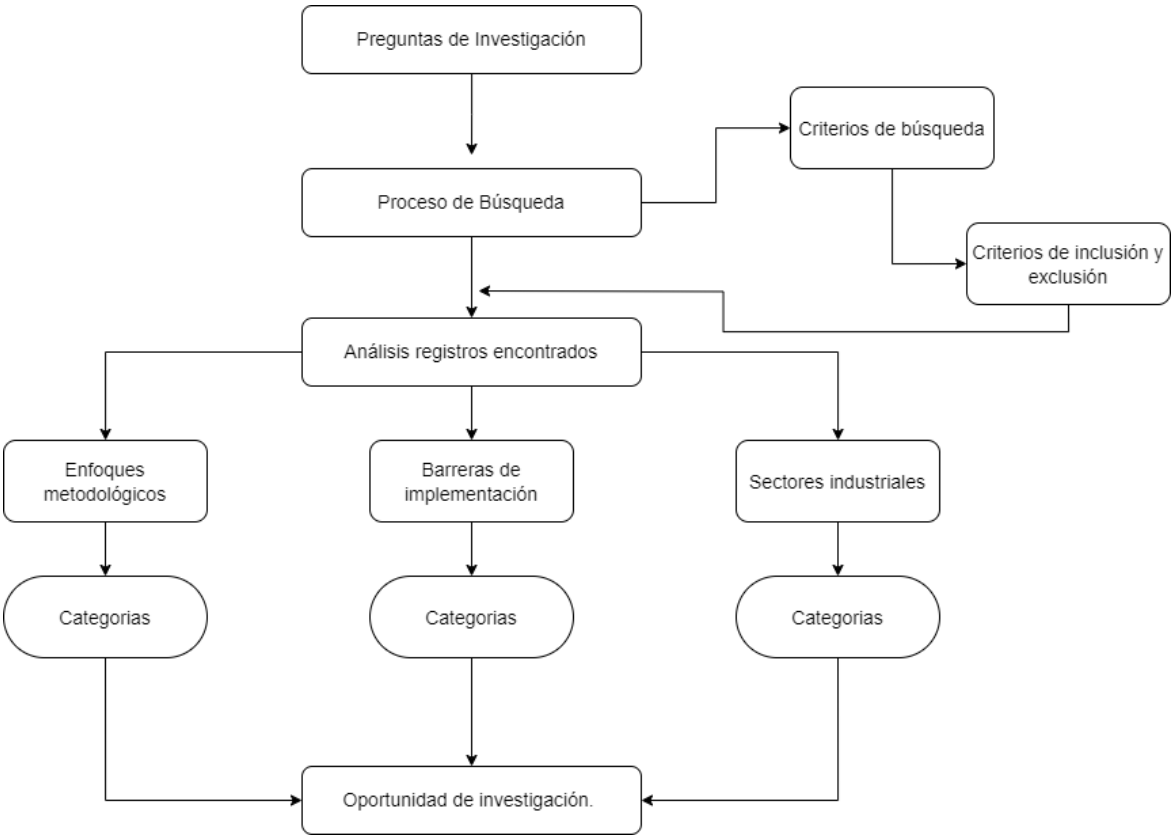
Posteriormente, se diseñaron criterios de búsqueda precisos y se llevaron a cabo búsquedas exhaustivas en diversas bases de datos académicas. Este proceso permitió recopilar una alta gama de estudios relevantes que abordan diferentes aspectos de la implementación de la Industria 4.0 en el contexto de las PYMES.

A continuación, se desarrolló una evaluación crítica de los estudios recopilados, centrándose en la identificación de enfoques metodológicos, barreras de implementación y tendencias sectoriales. Esta etapa de análisis permitió categorizar la literatura de manera significativa y extraer conclusiones clave sobre el estado actual de la investigación en este campo.

Finalmente, se presentan los hallazgos de la revisión sistemática, destacando las oportunidades de investigación identificadas y delineando las áreas donde se requiere un mayor enfoque investigativo. Estos descubrimientos no solo contribuyen al campo existente de conocimiento, sino que también proporcionan una base sólida para la formulación de estrategias efectivas destinadas a promover la adopción exitosa de la Industria 4.0 en las PYMES.

Figura 1, muestra el resumen de este capítulo que ofrece una visión más panorámica del estado actual de la implementación de la Industria 4.0 en las PYMES, destacando las áreas de investigación más relevantes y las oportunidades para futuras investigaciones en este campo dinámico y en constante evolución.

Figura 1.*Resumen capítulo estado del arte.*



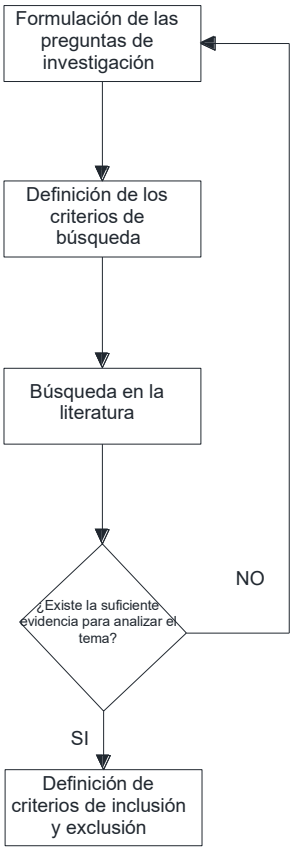
Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

1.1 Metodología de búsqueda

La revisión de literatura se desarrolló de forma iterativa, tal como se muestra en la **Figura 2.** *Etapas de refinamiento de la literatura*, con el fin de enfocar y delimitar la búsqueda dentro del campo de interés. Esta metodología ofrece un enfoque sistemático, lógico y claro para la investigación, permitiendo una evaluación precisa y una síntesis de los hallazgos mediante un análisis taxonómico. El objetivo principal de la anterior aproximación es identificar temáticas que pueden orientar investigaciones futuras. Las preguntas de indagación, definición de criterios de exploración, descripción de parámetros de inclusión y exclusión, valoración de la calidad de los artículos e identificación de oportunidades de estudios futuros, se toman de lo propuesto por Kitchenham et al., (2009).

Luego de finalizada la iteración de búsqueda (ver **Figura 2.** *Etapas de refinamiento de la literatura*), se obtuvieron resultados relevantes para el tema en general. Por lo tanto, se procede a realizar una evaluación de este material documental con el objetivo de responder a las preguntas de investigación planteadas, identificar las brechas en el conocimiento y explorar las posibles oportunidades de estudios a futuro que permitan formular una problemática.

Figura 2. *Etapas de refinamiento de la literatura*



Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

1.2 Formulación de preguntas de investigación

En primer lugar, se formularon las preguntas de investigación considerando el creciente interés de la comunidad científica en la Industria 4.0 en los últimos años. Dado que las PYMES representan aproximadamente el 99,5% de la economía colombiana (Franco-Ángel & Urbano, 2019) y desempeñan un papel fundamental en el desarrollo del país, resulta vital comprender cómo se ha abordado este tema para adquirir un conocimiento

sólido al respecto. Por lo tanto, se plantearon las siguientes cuestiones para la primera iteración:

1. ¿Qué metodologías desarrolladas por la comunidad científica existen, que permitan la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES?
2. ¿Cuáles son las variables críticas que intervienen en los modelos o metodologías propuestas?
3. ¿De qué sectores son las PYMES que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0? y en qué procesos?
4. ¿Qué condiciones deben cumplir las PYMES para poder implementar las tecnologías de la Industria 4.0?
5. ¿Existe alguna relación entre la implementación de la Industria 4.0 y la productividad, eficiencia y rentabilidad de las PYMES?

Tabla 1. *Resultados Iteración 1*

Base de datos	Iteración	Documentos Encontrados
WOS	1	317
Science Direct		10.195
IEEE		60
R. Elc. UNAL		424
Taylor & Francis		2.511
Scopus		645

Fuente: Elaboración propia.

De esta primera iteración, se encontraron diferentes problemas debido a la amplitud de las preguntas de investigación. Hubo una sobrecarga de información como se muestra en la Tabla 1. *Resultados Iteración 1*, además se observó la repetición de ciertas palabras clave en los artículos, por ejemplo: *"digital transformation", "requirements", "methodology", "adoption".*

Basándose en los resultados de la primera iteración y en la identificación de nuevos términos recurrentes en las búsquedas, se ajustaron las dos primeras preguntas de investigación para el segundo ciclo. Estas son:

1. ¿Qué metodologías desarrolladas por la comunidad científica existen, que permitan la transformación digital de las PYMES con un enfoque de Industria 4.0 ?
2. ¿Cuáles son las variables críticas que intervienen en las metodologías propuestas de implementación de la Industria 4.0?
3. ¿De qué sectores son las PYMES que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0 y en qué procesos?
4. ¿Qué condiciones deben cumplir las PYMES para poder implementar las tecnologías de la Industria 4.0?
5. ¿Existe alguna relación entre la implementación de la Industria 4.0 y la productividad, eficiencia y rentabilidad de las PYMES?

Tabla 2. *Resultados Iteración 2*

Base de datos	Iteración	Documentos Encontrados
WOS	2	46
Science Direct		4340
IEEE		10
R. Elc. UNAL		133
Taylor & Francis		1305
Scopus		72

Fuente: Elaboración propia.

En esta segunda iteración, se observaron términos de búsqueda similares a los del primer ciclo. Por lo tanto, se tomó la decisión de eliminar algunas de las preguntas de investigación, ya que estaban implícitas en otras. Por ejemplo, el interrogante número 4 se consideró implícito en el 1; debido a que responder dicha duda conlleva necesariamente a contestar el 4. Como resultado, los cuestionamientos que guiarán el proceso de revisión sistemática de literatura:

1. ¿Qué metodologías han sido propuestas que permitan la transformación digital de las PYMES con un enfoque de Industria 4.0?
2. ¿Cuáles son las barreras que dificultan la implementación de las herramientas de Industria 4.0 en las PYMES?
3. ¿De qué sectores son las PYMES que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0 exitosamente?

1.3 Criterios de Búsqueda

Para el proceso de búsqueda se tuvieron en cuenta los artículos publicados en revistas indexadas y seriadas en el periodo comprendido entre 2017 y 2023. Debido a que, según lo demostrado por Belman-López et al. (2020), este período ha sido el foco principal de las investigaciones relacionadas con la implementación de la industria y las condiciones asociadas a ella. Se utilizaron las siguientes bases de datos: *Web of Science, Science Direct, IEEE*, Recursos electrónicos UNAL, *Taylor & Francis y Scopus.* La exploración se realizó considerando los campos de *"Abstract", "Tittle" y "Keywords"*.

Se realizará una búsqueda previa basada en las ecuaciones de búsqueda descritas a continuación, para la iteración 1:

- "Industry 4.0" **AND (**methodology **OR** approach**) AND** SMEs
- "Industry 4.0" **AND** SMEs **AND** methodologies **AND (**variables **OR** factors**)**
- "Industry 4.0" **AND** SMEs **AND (**sectors **OR** fields) **AND** process

- "Industry 4.0" **AND** SMEs **AND (**conditions **OR** requirements**) AND (**implementation **OR** adoption**)**
- Implementation **AND** "industry 4.0" **AND (**productivity **OR** efficiency**) AND** SMEs **AND (**impact **OR** relationship**)**

Al emplear las ecuaciones de búsqueda previamente establecidas, se identificaron aproximadamente 14.152 artículos durante la primera iteración. Durante este proceso, se observaron ciertos parámetros y palabras recurrentes en la literatura examinada. Basándonos en estas observaciones, se realizaron ajustes para el segundo ciclo, lo que llevó a la creación de las siguientes fórmulas de indagación:

- Methodology **AND** "digital transformation" **AND** SME **AND** adoption.
- "Critical variables" **AND** adoption **AND** "industry 4.0" **AND** SME
- "Business sectors" **AND** SME **AND** implementation **AND** "industry 4.0"
- "Industry 4.0" **AND** SMEs, requirements, **AND** implementation
- Implementation **AND** "industry 4.0" **AND (**productivity **OR** efficiency**) AND** SMEs **AND** impact

Al emplear las ecuaciones de búsqueda mencionadas, se lograron identificar cerca de 5.906 artículos pertinentes durante la segunda iteración; en el proceso se observó presencia de términos recurrentes en la literatura, lo que conllevó a considerar necesario realizar ajustes para la siguiente repetición. Como resultado, se determinaron las siguientes fórmulas de indagación resultantes:

1. **("**digital transformation**" OR** digitalization **OR** "industry 4.0") **AND** (methodology **OR** approach **OR** framework) **AND** SME **AND** manufacturing
2. ("industry 4.0" **OR** digitalization **OR** "digital transformation") **AND** ("critical factors" **OR** "key factors" **OR** "barriers") **AND** SME
3. ("industry 4.0" **OR** digitalization **OR** "digital transformation") **AND** ("successful implementation" **OR** "successful adoption" **OR** "case study") **AND** SME

Tabla 3. *Resultados Iteración 3.*

Base de datos	Iteración	Documentos Encontrados
WOS	3	23
Science Direct		155
IEEE		50
R. Elc. UNAL		38
Taylor & Francis		48
Scopus		283

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 3. *Resultados Iteración 3.*, en el tercer ciclo utilizando las últimas ecuaciones de búsqueda mencionadas, se identificaron 597 artículos de interés que servirán como base para la revisión sistemática. Se intentó llevar a cabo una cuarta iteración, pero los resultados obtenidos fueron los mismos. Por lo tanto, podemos concluir

que esta repetición marca el cierre del proceso iterativo. Este hecho indica que existe evidencia suficiente para llevar a cabo un análisis del estado del arte sobre este tema en particular. Durante la iteración 3, se utilizaron tres ecuaciones de búsqueda aplicadas en distintas bases de datos, abarcando los campos de *"Abstract", "Tittle"* y *"Keywords"*. A continuación, se definirán algunos criterios de inclusión y exclusión, y se continuará analizando la literatura en busca de escritos relevantes para el propósito de esta revisión bibliográfica.

1.4 Definición de criterios de inclusión y exclusión

Una vez obtenidos los resultados de las búsquedas en bases de datos, se definieron criterios para determinar si un documento debía ser incluido o excluido de la revisión sistemática de literatura. Para la selección de los documentos relacionados con el tema de implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES, se tuvieron en cuenta 3 principios de inclusión:

- Material bibliográfico donde el tema central del resumen *(abstract)* se encuentre relacionado con las palabras claves mencionadas en la fórmula de búsqueda.
- Los artículos que mencionan metodologías para la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES
- Material bibliográfico que mencione los sectores y procesos de las PYMES que han implementado tecnologías de la Industria 4.0

Por otra parte, se eliminó el material bibliográfico que cumpla con los siguientes criterios de exclusión:

- Material bibliográfico duplicado.
- Material bibliográfico que no relacione en su título temas como Industria 4.0-PYMES o sectores.
- Material bibliográfico que en su resumen y palabras claves no tenga relación con Industria 4.0 o transformación digital y PYMES.

1.5 Ejecución del SLR

Siguiendo los criterios de búsqueda, inclusión y exclusión previamente expuestos, la Tabla 4. *Búsqueda de documentos aplicables a la investigación.* presenta el recuento de documentos encontrados, duplicados, rechazados y considerados para la Revisión Sistemática de Literatura (RSL) en cada base de datos examinada. El proceso iterativo arrojó un total de 597 artículos, que constituyen el pilar fundamental para el análisis de la bibliografía. Posteriormente, se aplicaron los parámetros de inclusión y exclusión descritos, lo que resultó en la selección de 102 trabajos científicos listos para la siguiente fase de evaluación.

Tabla 4. *Búsqueda de documentos aplicables a la investigación.*

Base de datos	N° Ecuación de búsqueda	Documentos Encontrados	Documentos Repetidos	Documentos Excluidos	Documentos para Revisión
WOS	1	72	0	45	27
Science Direct		97	7	68	22
IEEE		17	0	12	5
R. Elc UNAL		13	0	10	3
Taylor & Francis		11	5	5	1
Scopus		97	47	31	19
WOS	2	19	5	8	6
Science Direct		50	17	22	11
IEEE		14	14	0	0
R. Elc UNAL		13	13	0	0
Taylor & Francis		14	3	8	3
Scopus		55	29	27	0
WOS	3	37	15	18	4
Science Direct		27	13	13	1
IEEE		15	15	0	0
R. Elc UNAL		13	13	0	0
Taylor & Francis		18	9	8	0
Scopus		14	3	11	0
				TOTAL	**102**

Fuente: Elaboración propia.

1.5.1 Evaluación de los artículos

El proceso de evaluación de los 102 trabajos científicos se desarrolló aplicando una calificación basada en cuatro criterios, determinando la pertinencia y relevancia por separado de los documentos con respecto al tema de investigación. Estos parámetros, detallados en la Tabla 5.Criterios *de evaluación de contenido de los artículos relacionados.*, asignaron un puntaje a cada opción de respuesta de acuerdo con: No cumple (N) = 0, Cumple parcialmente (P) = 0.5 y Sí cumple (S) = 1. El Anexo A, se construyó conforme a estas reglas, resaltando la contribución individual principal de los 102 artículos, junto con la valoración de los principios establecidos.

Tabla 5.*Criterios de evaluación de contenido de los artículos relacionados.*

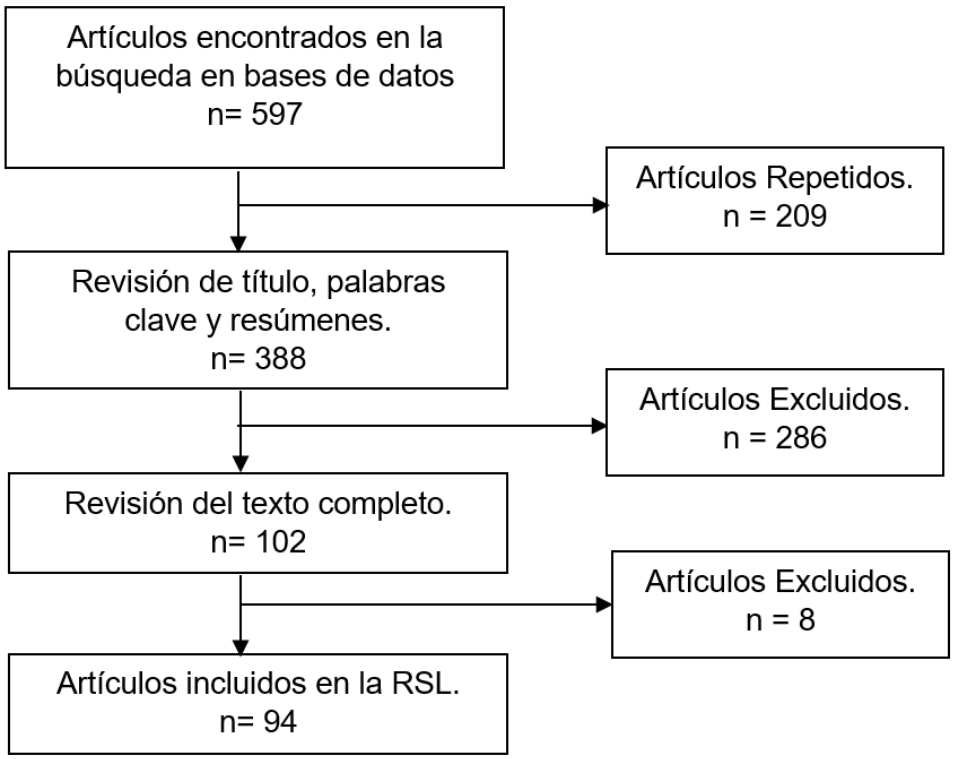
Criterios	Valoración
C1: ¿El artículo aborda directamente el tema de	**No (N):** El artículo no menciona ni se relaciona con la implementación de la I4.0 en las PYMES.

la implementación de la Industria 4.0 en las PYMES?	**Parcialmente (P):** El artículo menciona o aborda parcialmente el tema de la implementación de la I4.0 en las PYMES, pero no lo desarrolla de manera exhaustiva
	Sí (S): El artículo se centra directamente en la implementación de la I4.0 en las PYMES y proporciona un análisis completo y detallado.
C2: ¿El artículo presenta nuevas ideas, enfoques o contribuciones originales en el campo de la implementación de la industria 4.0 en las PYMES?	**No (N):** El artículo no presenta nuevas ideas, enfoques o contribuciones originales al campo de la implementación de la I4.0 en las PYMES.
	Parcialmente (P): El artículo presenta algunas ideas o enfoques parcialmente originales, pero no aporta contribuciones significativas al campo.
	Sí (S): El artículo presenta ideas, enfoques o contribuciones originales y valiosas al campo de la implementación de la I4.0 en las PYMES.
C3: ¿El artículo presenta una metodología sólida y apropiada para responder a sus preguntas de investigación?	**No (N):** El artículo carece de una metodología clara o su metodología no es adecuada para responder las preguntas de investigación.
	Parcialmente (P): El artículo presenta una metodología parcialmente sólida y adecuada, pero podría haber mejoras o más detalles en su descripción.
	Sí (S): El artículo presenta una metodología sólida y apropiada que se alinea eficazmente con sus preguntas de investigación.
C4: ¿El artículo considera el contexto de las PYMES y proporciona información aplicable y relevante para estas empresas?	**No (N):** El artículo no considera el contexto de las PYMES ni proporciona información aplicable o relevante de estas empresas.
	Parcialmente (P): El artículo menciona el contexto de las PYMES o proporciona información parcialmente aplicable o relevante, pero no de manera completa.
	Sí (S): El artículo considera adecuadamente el contexto de las PYMES y proporciona información clara, aplicable y relevante para estas empresas.

Fuente: Elaboración propia.

Después de evaluar los 102 trabajos científicos, se excluyeron 8 artículos porque tenían calificaciones menores a 1.5, por ende no se consideraron relevantes ni pertinentes para el estudio. Como resultado se identificaron 94 artículos que contribuyen al análisis y son importantes para la investigación presentada en este trabajo. La Figura 3. *Resumen de la ejecución de la RSL*, proporciona un resumen visual de la evolución del proceso que condujo a la selección de estos artículos, destacando las diferentes etapas involucradas.

Figura 3. *Resumen de la ejecución de la RSL*

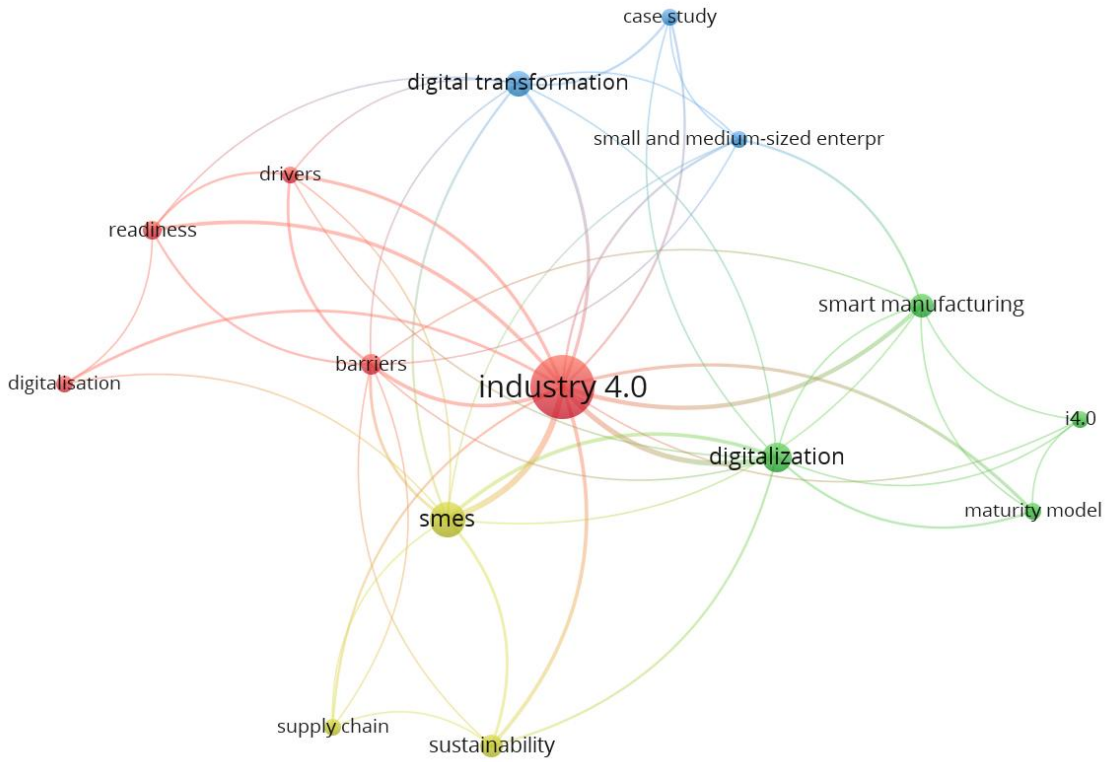


Fuente: Adaptado de "Industry 4.0 and micro and small enterprises: systematic literature review and analysis" Por N. A. da Silva., et al, 2022, Production and Manufacturing Research, 10(1), 696-726.

Los resultados de la información presentada en los 94 artículos se analizaron utilizando la herramienta VOS Viewer® de las palabras clave, lo que proporcionó diferentes puntos visuales de análisis, tal como lo muestra la **Figura 4.** *Relación de palabras clave en los artículos de interés* **Figura 3.** *Resumen de la ejecución de la RSL* En esta ilustración, se destacan los nodos principales que se han investigado: *Transformación Digital, PYME*, *Smart Manufacturing, Modelo de madurez, Sostenibilidad, Alistamiento* entre otros temas relacionados con la temática de esta revisión.

La evaluación de los artículos resalta la existencia de diversas áreas temáticas interrelacionadas que convergen en el paradigma de la Industria 4.0. Este enfoque abarca y relaciona todos los demás conceptos dentro de esta temática. Por ejemplo, en la **Figura 4.** *Relación de palabras clave en los artículos de interés*, se observa una relación entre las barreras – PYMES – y la Manufactura Digital, lo que evidencia la constante presencia de investigaciones que abordan estos temas en la literatura considerados para el análisis.

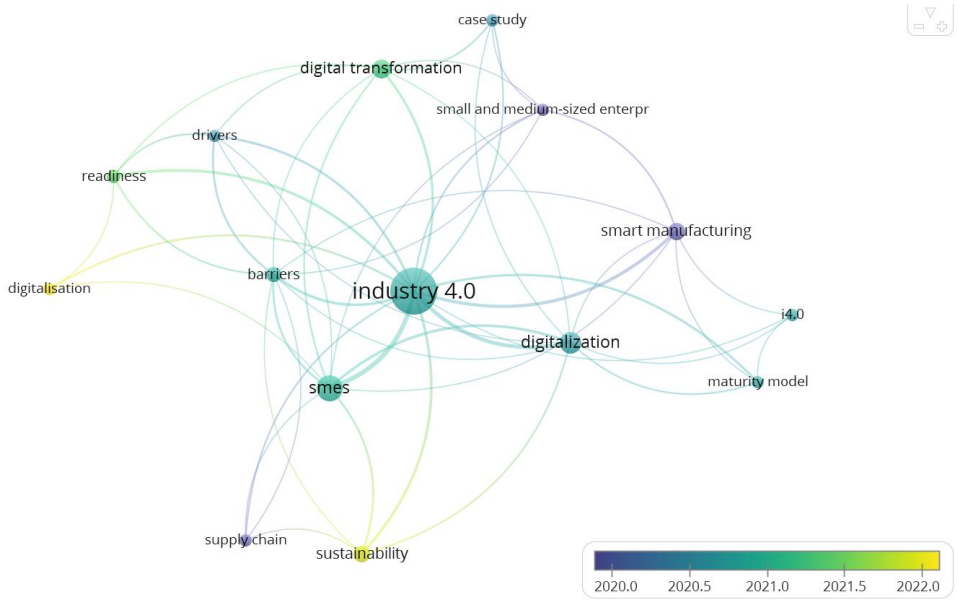
Figura 4. *Relación de palabras clave en los artículos de interés*



Fuente: Elaboración propia usando VOS Viewer®

Por otro lado, la **Figura 5.** *Relación de palabras clave orden cronológico.*, muestra una representación visual de la relación cronológica de la temática investigada. En ella, se indica cómo ha evolucionado el campo de estudio y qué se está investigando actualmente. Las relaciones de color morado representan las palabras clave relacionadas con artículos del año 2020, destacando la investigación sobre PYME y *Smart Manufacturing,* a través de casos de estudios como los relacionados por Peukert et al., (2020);Chonsawat & Sopadang, (2020); Turkyilmaz et al., (2020). Las conexiones verdes competen a temáticas vinculadas con escritos del 2021, donde se ha investigado acerca de *Modelos de Madurez, Transformación Digital, Impulsores y Barreras de implementación de la Industria 4.0,* esto se ejemplifica en los trabajos de Amaral & Peças, (2021a); Ramírez-Durán et al., (2021);Stentoft et al., (2021). Finalmente, los enlaces amarillos corresponden con las investigaciones actuales en el tema hasta finales del 2022; aquí se aprecia una tendencia a estudiar temas alrededor de la *digitalización de los procesos y organizaciones de la misma manera que la sostenibilidad de dichas instituciones en el mercado,* tal cual lo presentan McFarlane et al., (2022);Riedel, (2022) yBouchard et al., (2022).

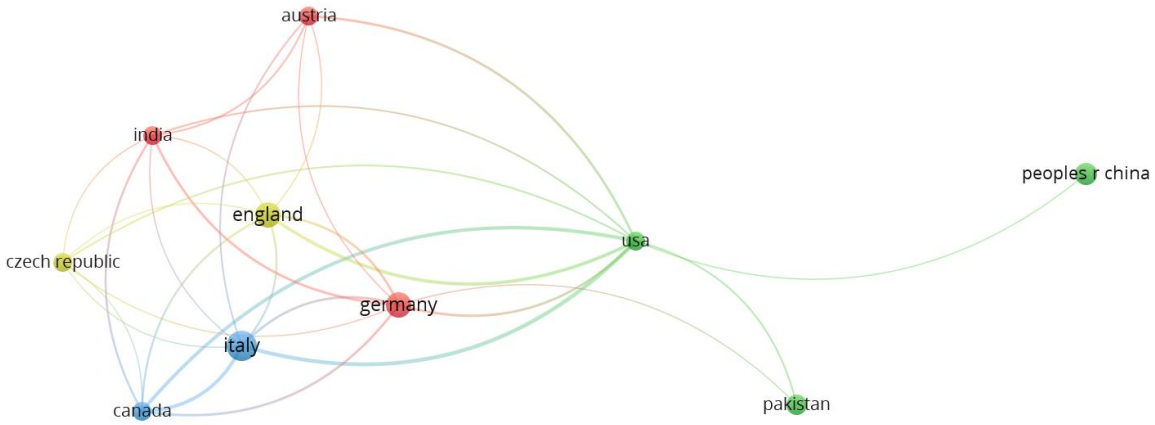
Figura 5. *Relación de palabras clave orden cronológico.*



Fuente: Elaboración propia usando VOS Viewer®

En la **Figura 6.** *Relación de citaciones entre países de la implementación*, se presenta la relación de citaciones entre los países que han investigado el tema de interés para este estudio. Se destaca que Alemania, Inglaterra, Austria, Italia e India son los estados que lideran las investigaciones y tienen el mayor número de referencias en el ámbito académico sobre la materia. Además, se observa un crecimiento emergente en la investigación en Estados Unidos, China y Pakistán, indicando que estas naciones cuentan con una cifra menor de autores citados, pero están mostrando un atractivo creciente en la temática.

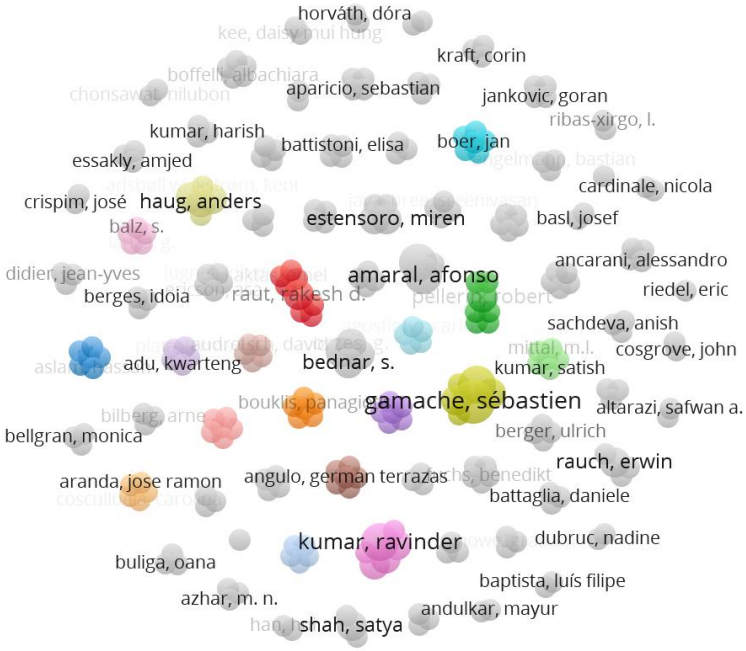
Figura 6. *Relación de citaciones entre países de la implementación*



Fuente: Elaboración propia usando VOS Viewer®

Es conveniente conocer a los autores más representativos que han investigado esta temática sobre los factores que influyen en la implementación de tecnologías de la Manufactura Digital en las PYMES. Sin embargo, no se identificaron investigadores relevantes, ya que las conexiones entre ellos son pequeñas debido a su bajo número de publicaciones relacionadas. La **Figura 7.** *Implementación de tecnologías de la Manufactura Digital en las PYMES – Autores.* muestra dicha información.

Figura 7. *Implementación de tecnologías de la Manufactura Digital en las PYMES – Autores.*



Fuente: Elaboración propia usando VOS Viewer®

1.6 Análisis de datos

Después de evaluar los artículos, se procedió al análisis de la información provista por los 94 registros. Siguiendo los criterios de Kitchenham et al. (2009), se recomendó la organización de los artículos para comprender las tendencias de investigación. Para ello, se creó una plantilla de Excel que recopiló información de los artículos, incluyendo autores, año, palabras clave, resumen, metodología, resultados y conclusiones. Elementos que permitieron dimensionar las contribuciones de cada artículo.

Una vez se analizaron los registros, se encontró una amplia variedad de enfoques disponibles sobre el tema de interés. Por lo cual, se consideró necesario realizar un análisis taxonómico de los artículos recopilados para clasificar y organizar sistemáticamente las diferentes perspectivas y contribuciones.

Para esto, se consideró en primer lugar explorar los registros por pregunta de investigación, es decir por su contribución a la respuesta del cuestionamiento. Luego, se realizó un recuento de los registros que cabían en la solución; posteriormente se analizó su metodología y se determinó su caracterización.

Por ejemplo, al analizar los registros relacionados con la pregunta de investigación sobre las metodologías de implementación de la transformación digital en las PYMES, se identificaron inicialmente 52 artículos que abordan el tema en específico. Luego, se procedió a revisar cada uno de estos artículos para determinar su metodología de investigación, lo que permitió clasificarlos en diferentes categorías según el enfoque metodológico utilizado. Se observó que la mayoría de los artículos empleaban un enfoque cuantitativo basado en estudios de caso, mientras que otros optaban por encuestas o análisis estadísticos.

Después de esta primera etapa de clasificación, se realizó un recuento de los artículos en cada categoría y se analizó su contenido para clasificarlos en función de su relevancia para la investigación. Por ejemplo, se identificó que los estudios de caso proporcionaban una comprensión más profunda de las prácticas de implementación en contextos específicos, mientras que estudios cuantitativos ofrecían datos cuantificables sobre el impacto de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES.

Este proceso permitió organizar sistemáticamente los artículos según su enfoque metodológico y su relevancia para esta primera parte de la investigación, proporcionando una base sólida para la síntesis de datos e identificación de oportunidades de investigación.

1.6.1 Enfoques metodológicos para la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES

Los enfoques metodológicos para implementar la Industria 4.0 son fundamentales para las PYMES, ya que proporcionan orientación y estructura para el proceso de transformación digital (McFarlane et al., 2022). Estas empresas suelen enfrentarse a desafíos a la hora de adoptar nuevas tecnologías debido a la heterogeneidad de los sistemas de información, a los recursos limitados y a la falta de estudios de investigación específicos (Wong & Kee, 2022).

La implementación de la Manufactura Digital requiere infraestructuras tecnológicas sólidas, la interoperabilidad de los sistemas y la integración de varios aspectos, como la tecnología, la organización y el entorno (Gamache et al., 2019). En este contexto, las metodologías proporcionan un marco para comprender el grado de implementación de la Manufactura Digital, desarrollar estrategias adecuadas e identificar factores críticos de éxito (Kent et al., 2019). Estas metodologías ofrecen acciones específicas que deben llevarse a cabo en las diferentes etapas el proceso de transformación, garantizando que todos los factores necesarios se consideren y gestionen de manera eficaz. Al seguir estas prácticas, las

PYMES pueden superar las limitaciones de los sistemas de fabricación tradicionales, mejorar la eficiencia, la flexibilidad y la agilidad y alcanzar niveles más altos de productividad y competitividad (Piat et al., 2023).

- ***Definición de Categorías***

El análisis exploratorio realizado es el primer paso para comenzar con una definición taxonómica de las diferentes categorías de análisis. Para lograr esto, la estructura taxonómica debe expandirse mediante la inclusión de niveles adicionales que amplíen su descripción, considerando criterios de exhaustividad que abarquen el conjunto completo de investigación seleccionado para la clasificación, además de parsimonia, que implica evitar la inclusión de categorías superfluas, mientras que la utilidad se refiere a la incorporación de criterios significativos. Estos aspectos son importantes para comprender el contexto de las metodologías de implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES (Castañeda-Valencia & Correa-Espinal, 2022).

Partiendo de los 52 registros que abordan los enfoques metodológicos para la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 , y con el objetivo de garantizar la exhaustividad, que implica considerar todos los estudios previos relevantes para asegurar la inclusión de todas las perspectivas y hallazgos pertinentes, así como la parsimonia, que busca mantener la investigación simple y concisa al eliminar elementos superfluos y redundantes, se han definido cinco (5) categorías: Metodologías de implementación, Modelos de Madurez, Factores impulsadores, Hojas de Ruta y Marco de evaluación. La **Tabla 6.** *Categorías definidas de los enfoques metodológicos encontrados* presenta la descripción, ejemplos y su aplicabilidad de estas categorías.

Tabla 6. *Categorías definidas de los enfoques metodológicos encontrados*

Categorías	Descripción	Ejemplos	Aplicabilidad
Metodologías de implementación	Se presentan enfoques sistémicos y estructurados utilizados para implementar tecnologías de la Industria 4.0 (Ramírez-Durán et al., 2021).	Lean Manufacturing, Six Sigma, Agle, Waterfall, Digicor, Desing Thinking.	Se discute cómo estas metodologías pueden adaptarse y aplicarse en entornos empresariales específicos.
Modelos de Madurez	Se presentan modelos que evalúan el nivel de madurez de una organización en términos de su adopción de tecnologías digitales (Steinlechner et al., 2021).	MM de Gartner, Modelos de Madurez de Capacidades digitales.	Se discute cómo estos modelos pueden ayudar a las PYMES a evaluar su progreso en la transformación digital y establecer objetivos claros.
Factores impulsadores	Son elementos internos y externos que influyen en la adopción y éxito en la transformación digital de la PYME. Estos factores pueden incluir cambios en la demanda del mercado, avances tecnológicos, regulaciones gubernamentales y cambios en la cultura organizativa (Khin & Kee, 2022).	Innovación tecnológica, demanda del mercado, competencia, cambios en la legislación.	Identificar y comprender los factores impulsadores permite a las PYMES anticipar cambios en el entorno empresarial y adaptar sus estrategias de transformación digital para mantenerse competitivas y relevantes.

Hojas de Ruta	Son planes estratégicos detallados que delinean los pasos específicos y las actividades necesarias para lograr los objetivos de transformación digital a largo plazo. (Ibrahim et al., 2023)	Plan de transformación digital, Plan de implementación de Tecnologías 4.0.	Las hojas de ruta ayudan a las PYMES a establecer un plan de acción coherente y realista para la implementación gradual de la transformación digital, asegurando una transición suave y minimizando los riesgos asociados.
Marcos de evaluación	Herramientas estructuradas que permiten a las PYMES medir y evaluar el progreso y el impacto de la transformación digital en la organización. Estos marcos incluyen indicadores clave de rendimiento (KPI) y métricas específicas para evaluar el éxito de la implementación (Essakly et al., 2019).	Balanced Scorecard, Cuadro de mando integral (CMI), Cuadro de mando Digital.	Los marcos de evaluación ayudan a las PYMES a monitorear continuamente su rendimiento digital, identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para optimizar la eficacia y el retorno de la inversión en tecnología digital.

Fuente: Elaboración propia.

Las categorías previamente mencionadas proporcionan una respuesta integral a la pregunta de investigación: ¿Qué metodologías han sido propuestas que permitan la transformación digital de las PYMES con un enfoque de Industria 4.0? Esta representación se alinea con el último criterio, la utilidad. La Tabla 7, presenta a los autores y sus respectivas representaciones porcentuales con respecto al total de los registros estudiados que abarquen los enfoques metodológicos. Por ejemplo, la categoría de metodologías de implementación representa el 61,5% de los enfoques metodológicos encontrados en la literatura y así con las demás categorías.

Tabla 7. *Representación de autores según categorías enfoques metodológicos.*

Categorías	Autores	%
Metodologías de Implementación	(Dossou et al., 2022a), (Majstorovic et al., 2020), (McFarlane et al., 2022), (Peukert et al., 2020), (Ramírez-Durán et al., 2021), (Centea et al., 2020), (Contreras Pérez et al., 2018), (Chonsawat & Sopadang, 2020), (Powell et al., 2021), (Busto Parra et al., 2022); (Bär et al., 2018), (Mehdiyev et al., 2022), (Baptista & Barata, 2021), (Rauch & Brown, 2019), (Traganos et al., 2021), (Ramírez-Durán et al., 2021), (Castañeda Valencia, 2022), (James & Shetty, 2020), (Powell et al, 2021), (Cotrino et al., 2020), (Soni et al., 2022), (Doyle & Cosgrove, 2019), (Stankovska et al., 2016), (Sachdeva et al., 2022), (Abdulnour et al., 2022), (Bouchard et al., 2022), (Amaral et al., 2020), (Liu et al., 2022), (Dutta et al., 2021), (Estensoro et al., 2022), (Jayashree et al., 2021)	61.5%
Modelos de Madurez	(Amaral & Peças, 2021b), (Amaral et al., 2021ª), (Nameem & Garengo, 2022), (Mittal et al., 2018),	13.5%

	(Simetinger & Basl, 2022), (Galindo, 2019), (Steinlechner, et al., 2021)	
Factores impulsadores	(Wong & Kee, 2022), (Schmitt et al., 2020), (Kilimis et al., 2019), (Kent et al., 2019), (Kraft et al., 2022)	9.6%
Hojas de Ruta	(Han & Trimi, 2022), (Abdulnour et al., 2022a); (Battistoni et al.,2023)	5.8%
Marcos de evaluación	(Essakly et al., 2019), (Gamache et al., 2019), (Mohammadian et al., 2022), (Chonsawat & Sopadang, 2020), (R. P. Silva et al., 2022)	9.6%

Fuente: Elaboración propia.

1.6.2 Obstáculos y barreras de implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES

Es importante comprender los obstáculos y barreras para la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES por varias razones. En primer lugar, ayuda a comprender los desafíos a los que se enfrentan las pequeñas y medianas empresas a la hora de adoptar estas tecnologías, como la falta de conocimientos y experiencia, los beneficios poco claros y la percepción negativa de la tecnología (Peillon & Dubruc, 2019). Este conocimiento puede guiar a los responsables políticos y a los lideres del sector a la hora de desarrollar estrategias para abordar estas barreras y brindar apoyo a las PYMES en su proceso de transformación digital (Elhusseiny & Crispim, 2021).

En segundo lugar, al identificar estos obstáculos, las PYMES pueden priorizar sus esfuerzos y a asignar los recursos de manera eficaz para superar las barreras más influyentes, como los desafíos tecnológicos y la falta de instalaciones de TIC (Jones et al., 2021).

Al abordar estas barreras, las PYMES pueden aprovechar los beneficios potenciales de las tecnologías de la Industria 4.0, como la mejora del rendimiento de la innovación y la gestión de calidad (Türkeş et al., 2019). En general, comprender los obstáculos y barreras a la implementación es crucial para promover la adopción generalizada de las tecnologías de la Manufactura Digital en las pequeñas y medianas empresas e impulsar su crecimiento y competitividad en la era digital.

- ***Definición de categorías***

Al analizar los registros con la pregunta de investigación sobre las barreras de implementación de la Manufactura Digital en las PYMES, se identificaron inicialmente 36 artículos que abordan el tema en específico. Con el objetivo de garantizar la exhaustividad, que implica considerar todos los estudios previos relevantes para asegurar la inclusión de todas las perspectivas y hallazgos pertinentes, así como la parsimonia, que busca mantener la investigación simple y concisa al eliminar elementos superfluos y redundantes, se han definido seis (6) categorías: barreras tecnológicas, estratégicas, operacionales, relacionadas con la Mano de Obra, financieras y de infraestructura. La **Tabla 8.** *Categorías definidas de los obstáculos y barreras de implementación.* presenta la descripción, ejemplos y su aplicabilidad de estas categorías.

Tabla 8. *Categorías definidas de los obstáculos y barreras de implementación.*

Categorías	Descripción	Ejemplos	Aplicabilidad
Barreras tecnológicas	Están relacionadas con la falta de infraestructura tecnológica adecuada, incompatibilidad de sistemas, seguridad de datos y acceso a tecnologías emergentes (De Lucas Ancillo et al., 2022).	Falta de conectividad de red confiable, sistemas heredados obsoletos, brechas de seguridad cibernética, falta de conocimientos en tecnologías emergentes como el internet de las cosas (IoT).	Las barreras tecnológicas pueden obstaculizar la implementación exitosa de la Industria 4.0 al dificultar la integración de sistemas de adopción de nuevas tecnologías(Türkeş et al., 2019).
Barreras estratégicas	Estas barreras se refieren a la falta de alineación entre la estrategia empresarial y la adopción de tecnologías digitales, así como la resistencia al cambio por parte de la alta gerencia. (Sachdeva et al., 2022).	Falta de una visión clara de la transformación digital, resistencia al cambio por parte de la alta dirección.	Las barreras estratégicas pueden impedir que las empresas adopten tecnologías de la Industria 4.0 de manera efectiva al no alinear sus objetivos empresariales con las iniciativas de transformación digital.
Barreras operacionales	Se relacionan con los problemas operativos internos, la gestión de la cadena de suministro y la logística (N. A. da Silva et al., 2022).	Ineficiencias en los procesos de producción, dificultades de gestión de inventario, problemas de calidad del producto, falta de flexibilidad en la cadena de suministro.	Las barreras operacionales pueden obstaculizar la implementación de la Industria 4.0 al limitar la capacidad de una empresa para adaptarse y responder ágilmente a los cambios del mercado y la demanda del cliente.
Barreras relacionadas con la mano de obra	Involucran desafíos relacionados con la capacitación del personal, la resistencia al cambio y la falta de habilidades digitales (Peillon & Dubruc, 2019).	Escasez de talento humano, resistencia al cambio por parte de los empleados, falta de habilidades técnicas y digitales.	Las barreras relacionadas con la mano de obra pueden dificultar la adopción de la Industria 4.0 al no contar con un personal capacitado y motivado para utilizar eficazmente las nuevas tecnologías.
Barreras financieras	Se refieren a la falta de recursos financieros y la percepción de altos costos asociados con la transformación digital (Shqair & Altarazi, 2022).	Limitaciones presupuestarias, percepción de altos costos de implementación, dificultades para justificar el retorno de inversión a corto plazo.	Las barreras financieras pueden dificultar la implementación de la Industria 4.0 al limitar la capacidad de una empresa para invertir en tecnologías y recursos necesarios para la transformación digital.
Barreras de infraestructura	Estas barreras se refieren a la falta de infraestructura física y digital necesaria para admitir la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 (Jayashree et al., 2020).	Falta de acceso a internet de alta velocidad, deficiencias en la energía y la infraestructura.	Las barreas de infraestructura pueden dificultar la implementación de la Industria 4.0 al limitar la capacidad de una empresa para

			aprovechar completamente las tecnologías digitales y la conectividad en su entorno operativo.

Fuente: Elaboración propia.

Las categorías previamente mencionadas proporcionan una respuesta integral a la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las barreras que dificultan la implementación de las herramientas de la Industria 4.0 en las PYMES? Esta representación se alinea con el último criterio, la utilidad. La **Tabla 9.** *Representación autores según categorías de los obstáculos y barreras de implementación.*, presenta a los autores y sus respectivas representaciones porcentuales con respecto al total de los registros estudiados que abarquen la temática estudiada en esta sección. Por ejemplo la categoría de barreras tecnológicas representa el 61,5% de los obstáculos y las barreras de implementación encontrados en la literatura y así con las demás categorías.

Tabla 9. *Representación autores según categorías de los obstáculos y barreras de implementación.*

Categorías	Autores	%
Barreas tecnológicas	(Peter et al., 2023), (De Lucas Ancillo et al.,2020), (Ericson et al., 2020), (Stentoft, et al., 2021), (Azhar et al., 2021), (Elhusseiny & Crispim, 2021), (Türkes et al., 2019)	19.4%
Barreas estratégicas	(Sharma et al., 2023), (Nazim et al., 2022), (Rauch et al., 2019) (Kwarteng et al., 2020), (Peter et al., 2023), (De Lucas Ancillo et al.,2020), (Ericson et al., 2020), (Stentoft, et al., 2021), (Azhar et al., 2021), (Andulkar et al., 2018), (Türkes et al., 2019)	30.5%
Barreras operacionales	(Da Silva et al., 2020), (Andulkar et al., 2018), (Türkes et al., 2019), (Elhusseiny & Crispim, 2021), (Pellion & Dubruc, 2019)	13.8%
Barreas relacionadas con la mano de obra	(Pellion & Dubruc, 2019), (Arcidiacono et al., 2019), (Orzes et al., 2018)	8.3%
Barreras financieras	(Shqair & Altarazi, 2022) (Nazim et al., 2020) (De Lucas Ancillo et al., 2020), (Ericson et al., 2020)	11.1%
Barreras de infraestructura	(Jayashree et al., 2020), (Türkes et al., 2019), (Elhusseiny & Crispim, 2021), (R. Kumar et al., 2020), (Tamvada et al., 2020), (Menon & Shah, 2020)	16.6%

Fuente: Elaboración propia.

1.6.3 Análisis de los sectores industriales y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0

El análisis de los sectores industriales y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0 revela un panorama diverso en cuanto a la implementación de estas tecnologías en empresas de diferentes tamaños y áreas. Por ejemplo, en el sector del transporte, que engloba la automoción, la aeronáutica y el ferrocarril, se observa una alta adopción por parte de grandes empresas, representando el 63% de las aplicaciones identificadas (Galizia et al., 2023).

Por otro lado, la adopción de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES está influenciada por su participación en la innovación abierta y del despliegue de capacidades tecnológicas. Las colaboraciones externas, en particular con las universidades impulsan a las pequeñas empresas a renovar sus capacidades tecnológicas, adoptando diferentes tecnológicas en función de modalidades de inversión que elijan (Bouchard et al., 2022).

En resumen, mientras que las grandes empresas del sector del transporte han integrado ampliamente las tecnologías de la Industria 4.0 las PYMES de diversos sectores también están incursionando en estas tecnologías, aunque con enfoques y niveles de adopción diferentes.

- ***Definición de categorías***

Al examinar los registros relacionados con la pregunta de los sectores industriales de las PYMES que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0, se detectaron inicialmente 42 artículos centrados en este tema específico. Con el propósito de asegurar la exhaustividad y la parsimonia a la hora de categorizar los artículos estudiados, buscando mantener la investigación simple y concisa. Se han definido las cinco (5) categorías: Sector agroalimentario, manufacturero, transporte, metal mecánico y tecnológico. La **Tabla 10.** *Categorías definidas de los sectores industriales y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0* proporciona una descripción detallada, ejemplos y la aplicabilidad de estas categorías.

Tabla 10. *Categorías definidas de los sectores industriales y su adopción de tecnologías de la Industria 4.0*

Categorías	Descripción	Ejemplos	Aplicabilidad
Sector agroalimentario	Este sector abarca todas las actividades relacionadas con la producción agrícola y la transformación de alimentos, desde la siembra y cosecha hasta el procesamiento y distribución de productos alimenticios.	Implementación de sectores de IoT para monitorear el estado de los cultivos, sensores de automatización en el procesamiento de alimentos	La adopción de tecnologías como IoT, Big Data entre otros en el sector agroalimentario permite mejorar la eficiencia de producción, garantizar la calidad y seguridad de los alimentos, así como optimizar la logística y distribución.
Sector manufacturero	Este sector engloba todas las actividades relacionadas con la fabricación de productos físicos, desde la producción de componentes hasta el embalaje final.	Implementación de sistemas de fabricación aditiva, robótica industrial para la automatización de procesos de embalaje, uso de gemelos digitales para la simulación y optimización de la producción.	La aplicación de tecnologías como la fabricación aditiva y la robótica contribuye a mejorar la eficiencia y flexibilidad en la producción, reducir los tiempos de ciclo y permitir la personalización de productos según las necesidades del cliente.
Sector transporte	Este sector comprende todas las actividades relacionadas	Implementación de vehículos autónomos	La adopción de tecnologías como la

	con el movimiento y bienes y personas, incluyendo también la industria automotriz, aeronáutica, ferroviaria y marítima.	en la industria automotriz, uso de drones para la inspección, de infraestructura en el sector ferroviario, aplicación de sistemas de gestión de flotas en el transporte marítimo.	inteligencia artificial, IoT y sistemas de navegación autónoma contribuye a mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en el transporte, así como a ofrecer nuevas experiencias y servicios a los usuarios.
Sector metal mecánico	Se centra en la fabricación de productos metálicos y mecánicos, incluyendo maquinaria industrial, equipos de transporte y componentes estructurales.	Implementación de sistemas de monitorización de la salud de la maquinaria mediante sensores IoT, uso de tecnologías de realidad aumentada para el mantenimiento predictivo.	La integración de tecnologías como IoT, realidad aumentada y sistemas de gestión energética permite optimizar los procesos de producción, reducir los costos de mantenimiento y mejorar la calidad de los productos en el sector metal mecánico.
Sector tecnológico	Este sector abarca todas las actividades relacionadas con el desarrollo, implementación y uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), incluyendo hardware, software y servicios digitales.	Implementación de solución de computación en la nube para el almacenamiento y procesamiento de datos, desarrollo de aplicaciones móviles para la gestión empresarial, utilización de tecnologías de inteligencia artificial para la optimización de procesos y toma de decisiones.	En el sector tecnológico, la adopción de tecnologías emergentes como la computación en la nube, inteligencia artificial y blockchain impulsa la innovación, la eficiencia operativa y la creación de nuevos modelos de negocio basados en datos y servicios digitales.

Fuente: Elaboración propia.

Las categorías definidas proporcionan una respuesta completa a la pregunta de investigación: ¿De qué sectores son las PYMES que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0 exitosamente? Este análisis se ajusta al último criterio de utilidad. En la **Tabla 11.** *Representación autores según categorías sectores industriales.*, se presentan los autores y sus porcentajes con respecto al total de los registros estudiados que abordan los sectores industriales que han implementado con éxito las herramientas de la Industria 4.0. Por ejemplo, la categoría de sector manufacturero constituye el 52,34% de los sectores industriales identificados en la literatura, y lo mismo se aplica a las demás categorías.

Tabla 11. *Representación autores según categorías sectores industriales.*

Categorías	**Autores**	**%**
Sector agroalimentario	(Bouchard et al., 2020), (Dossou et al., 2022a), (Konur et al., 2021)	7.1%
Sector manufacturero	(Rauch & Brown, 2019), (Traganos et al., 2021), (Ramírez-Durán et al., 2021), (Castañeda Valencia, 2022), (James & Shetty, 2020), (Powell et al, 2021),	52.3%

	(Cotrino et al., 2020), (Soni et al., 2022), (Doyle & Cosgrove, 2019), (Stankovska et al., 2016), (Sachdeva et al., 2022), (Abdulnour et al., 2022), (Bouchard et al., 2022), (Amaral et al., 2020), (Galindo, 2019), (Azhar et al., 2021), (Kilimis et al., 2019), (Andulkar et al., 2018), (Peter et al., 2023), (Amaral & Peças, 2021b), (Jayashree et al., 2021), (Elhusseiny & Cris nm-im, 2021)	
Sector transporte	(Müller et al., 2018), (Sachdeva et al., 2020), (Busto-P arra et al., 2022), (Selicati & Cardinale, 2021), (Sharma et al., 2023), (Schmitt et al., 2020), (Shah & Mattiuza, 2018), (Contreras Pérez et al., 2018), (Azhar et al., 2021), (Powell et al., 2021)	23.8%
Sector metal mecánico	(Prasad et al., 2020)	2.4%
Sector tecnológico	(Grube et al., 2019), (Centea et al., 2020), (Han & Trimi, 2022), (Marucci et al., 2023), (Cimini et al., 2021), (Powell et al., 2021)	14.3%

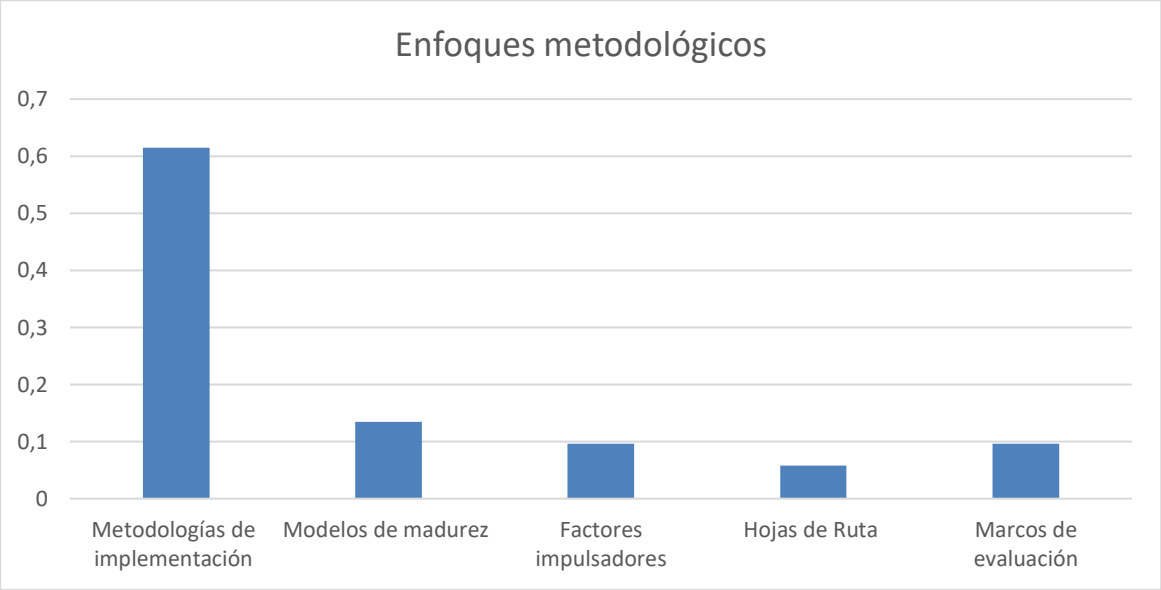
Fuente: Elaboración propia.

1.7 Resultados

La sección presenta los hallazgos obtenidos en la revisión sistemática de literatura realizada, los cuales se organizan de acuerdo con las preguntas de investigación planteadas. El propósito es suministrar una visión clara y detallada de las conclusiones para que contribuyan a encontrar oportunidades de estudio. Para ello, se exponen los datos recopilados en las Tablas Tabla 7. *Representación de autores según categorías enfoques metodológicos.*, Tabla **9.** *Representación autores según categorías de los obstáculos y barreras de implementación.* y Tabla **11.** *Representación autores según categorías sectores industriales.* acompañados de gráficos que ilustran las tendencias identificadas en la comunidad científica. Además, se lleva a cabo un análisis de estos resultados para ofrecer una comprensión más profunda de su relevancia en relación con los interrogantes planteados.

Para responder la primera pregunta de investigación: **¿Qué metodologías se han propuesto para facilitar la transformación digital de las PYMES con un enfoque en la Industria 4.0?** Se ha construido la Figura 8. *Gráfico Modelos de Enfoques metodológicos.*a través de los datos de la Tabla 7. *Representación de autores según categorías enfoques metodológicos.*, donde el número total de estudios considerados para el análisis (52), se lo ha divido entre el número de estudios en la categoría pertinente.

Figura 8. *Gráfico Modelos de Enfoques metodológicos.*



Fuente: Elaboración propia.

La literatura ha explorado diversos enfoques metodológicos de implementación las herramientas de la Industria 4.0 en las PYMES. Entre estos enfoques se incluyen metodologías de implementación, modelos de madurez, factores impulsadores, hojas de ruta y marcos de evaluación.

En ese sentido, de los 52 artículos que hablaban de enfoques metodológicos, 28 se enfocan en las metodologías de implementación, 7 abordan los modelos de madurez, mientras que 5 tratan sobre los factores impulsadores. Además, 3 artículos analizan las hojas de ruta y los últimos 5 se centran en los modelos de evaluación.

Entonces se puede afirmar que existen 5 enfoques metodológicos para facilitar la transformación digital de las PYMES; depende del tipo de PYME también la apuesta por el uso de uno de los enfoques anteriormente descritos.

Se puede observar en la Figura 8. *Gráfico Modelos de Enfoques metodológicos.*, que existe una clara tendencia a estudiar las metodologías de implementación antes que factores impulsadores, hojas de ruta, marcos de evaluación o modelos de madurez. Por ende, se puede concluir que existe una oportunidad de seguir explorando algunas de estas categorías descritas anteriormente.

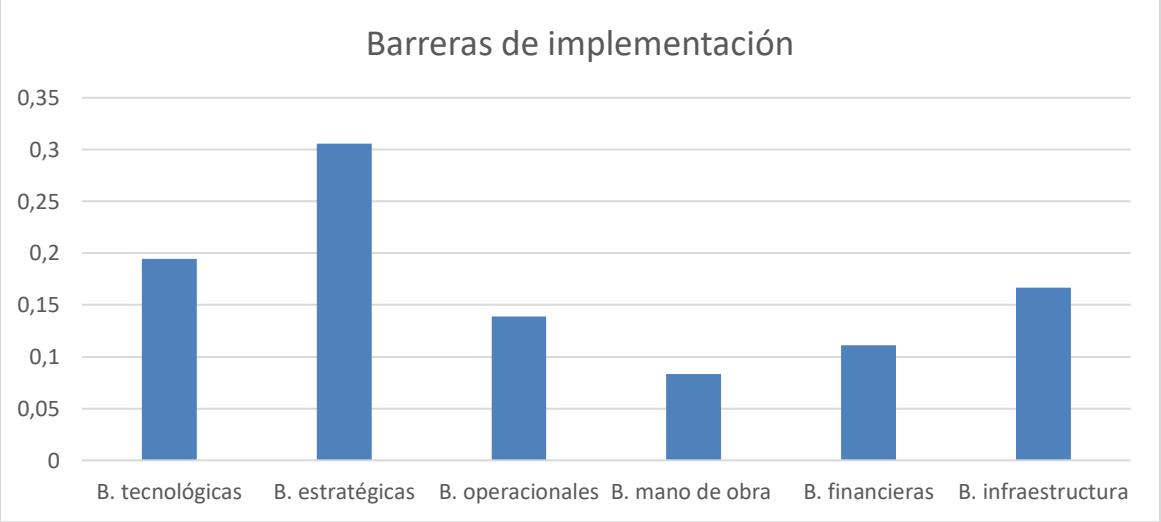
Asimismo, la segunda pregunta de investigación: **¿Cuáles son las barreras que dificultan la implementación de las herramientas de la Industria 4.0 en las PYMES?** Se abordo siguiendo la metodología anteriormente planteada. Se construyó la Figura 9 a partir de la información establecida en la Tabla 9. *Representación autores según categorías de los obstáculos y barreras de implementación.*, donde al considerar el total

de artículos de la revisión, se los divide en las categorías que fueron explicadas en secciones previas.

En este caso, los desafíos de implementación identificados fueron: barreras tecnológicas, estratégicas, operacionales, recursos humanos, financieros e infraestructura. Para calcular el porcentaje de frecuencia de los estudios relacionados con las categorías en especificas se dividió el número de artículos totales entre el número total de estudios considerados para la revisión sistemática de literatura de los obstáculos y barreras de implementación (36).

Entonces, para abordar la pregunta, se analizan las 6 categorías identificadas, siendo las barreras estratégicas la más investigada por la comunidad científica, con un total de 11 registros centrados en el estudio de estos desafíos. Además, se encontraron 5 artículos que tratan sobre las barreras operativas, 7 abordan los retos tecnológicos. Asimismo, se identificaron 3 estudios relacionados con las barreras relacionada con la mano de obra, 4 centrados en las barreras financieras y 6 que exploran las barreras de infraestructura.

Figura 9. *Gráfico Barreras de implementación investigadas*



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 9. *Gráfico Barreras de implementación investigadas*, la tendencia de la comunidad científica es a explorar las barreras estratégicas como gran obstáculo de las PYMES para poder implementar las herramientas de la Manufactura Digital, por otra parte existen oportunidades de investigación al profundizar un poco en las demás barreras encontradas.

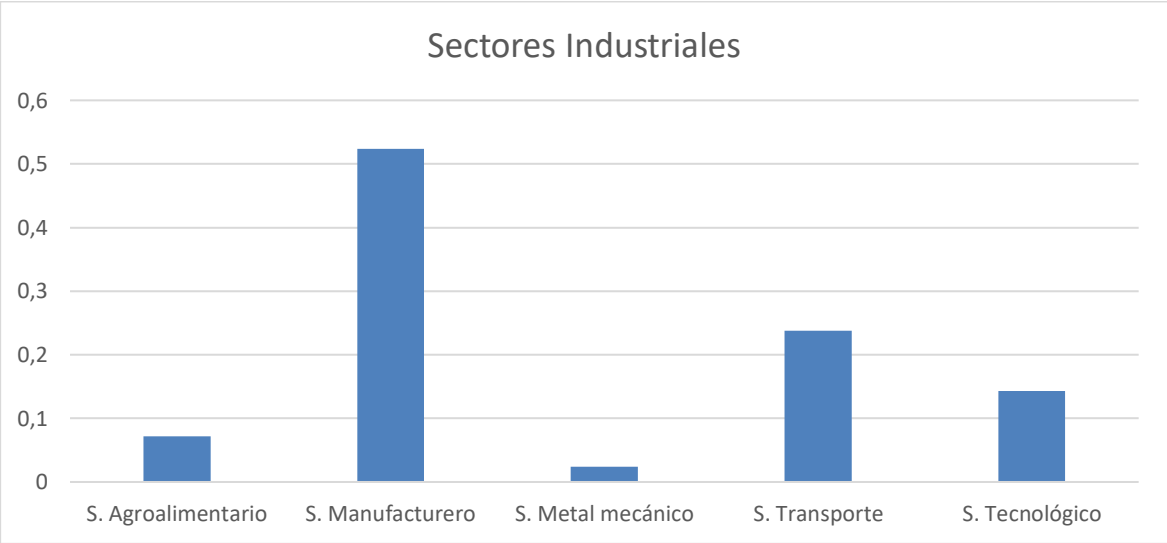
Finalmente, para responder la tercera pregunta de investigación: **¿De qué sectores son las PYMES que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0 exitosamente?** Se construye por lo tanto la Figura 10. *Gráfico Sectores Industriales explorados*, a partir de

la Tabla 11. *Representación autores según categorías sectores industriales.*, donde los artículos han sido categorizados según la información de cada uno. Por ejemplo, en el ámbito del sector metal mecánico, solamente se encontró un artículo que hable del tema por lo que se dividió este número entre el total de artículos considerados para la revisión sistemática y el resultado es el que se muestra en la Figura 10. *Gráfico Sectores Industriales explorados*.

Por lo tanto, los sectores que han implementado de manera exitosa las herramientas de la Industria 4.0 según la literatura son el sector agroalimentario, manufacturero, metal mecánico, transporte y tecnológico.

En términos de la calidad de trabajos científicos relacionados con cada sector, se observa que el sector manufacturero es el más investigado con 22 registros centrados en esta industria en particular. Por otro lado, el sector metal mecánico y agroalimentario muestran la menor cantidad de exploración, con solo 1 y 3 artículos respectivamente. Esto sugiere una oportunidad de investigación para explorar más a fondo estos sectores y su relación con la implementación de tecnologías de la Manufactura Digital. En contraste, tanto el sector tecnológico como el de transporte presentan una exploración significativa, con 6 y 10 estudios respectivamente, lo que representa una base sólida para la construcción de conocimiento en torno a estos temas en general.

Figura 10. *Gráfico Sectores Industriales explorados*



Fuente: Elaboración propia.

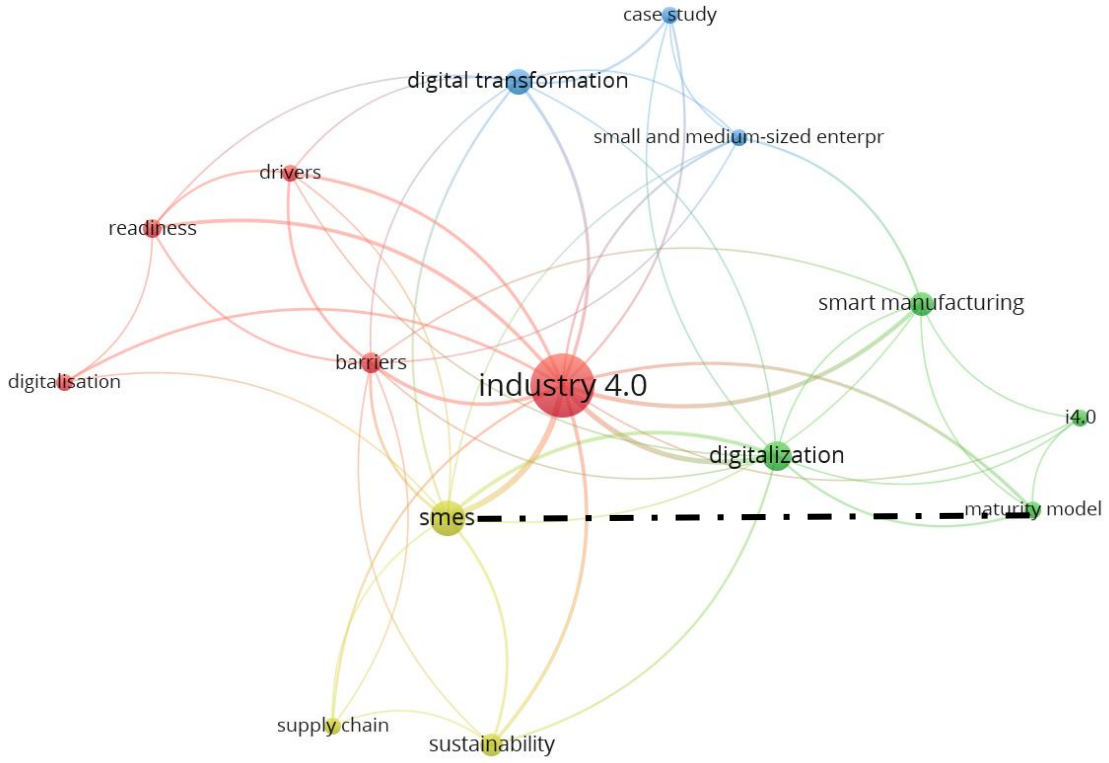
Por ende, se responde la pregunta de investigación, al encontrar dentro de la literatura 5 sectores relacionados con la implementación de las herramientas de la Industria 4.0 en las PYMES, se considera que el sector metal mecánico y el sector agroalimentario son los ámbitos menos explorados por la comunidad científica, por lo que se puede presentar una brecha en el conocimiento, que se puede abordar en el futuro.

1.8 Oportunidades de investigación

La transformación digital es crucial en el entorno empresarial actual, especialmente para las PYMES, ya que les permite mejorar su competitividad y adaptarse a los cambios de mercado. Por lo tanto, entender que tan preparadas están estas organizaciones para dicha adopción de la Manufactura Digital a través de un modelo de madurez puede resultar fundamental para su éxito a largo plazo.

Al observar las Figuras Figura **8.** *Gráfico Modelos de Enfoques metodológicos.*, Figura **9.** *Gráfico Barreras de implementación investigadas* y Figura **10.** *Gráfico Sectores Industriales explorados* se nota una brecha en investigación en relación con las PYMES del sector agroindustrial, así como en el uso de modelos de madurez y en el análisis de las barreras operacionales. Esta escasa profundización en este ámbito sugiere una oportunidad de investigación al explorar estos temas más a fondo. Además la Figura **11.** *Relación de oportunidad de investigación*, al analizar la red de relaciones entre los artículos, se ha identificado la inconexa línea entre los modelos de madurez y las PYMES lo que justifica la oportunidad de investigación como necesaria.

Figura 11. *Relación de oportunidad de investigación*



Fuente: Elaboración propia usando WOSViewer®

El presente trabajo se centrará en comprender cómo éstas dos áreas interrelacionadas pueden beneficiarse mutuamente, identificando así nuevas estrategias y mejores prácticas para promover la adopción exitosa de la Industria 4.0 en las pequeñas y medianas empresas.

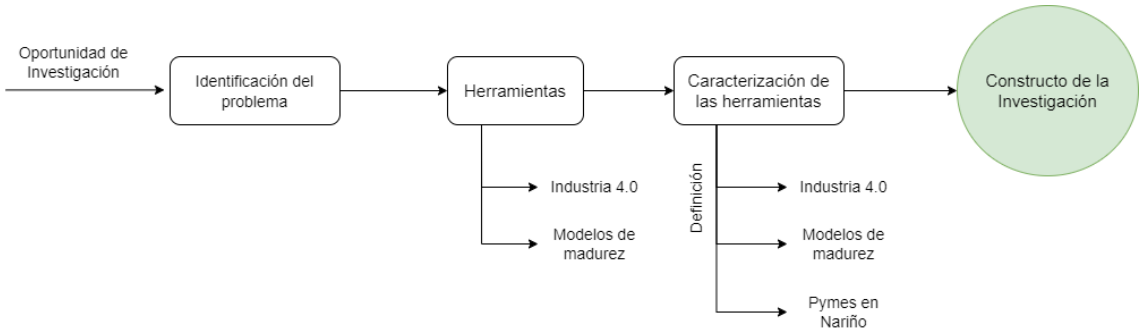
Además de lo anterior, también se mira en el horizonte oportunidades de investigación relacionadas con la profundización del estudio de las barreras de implementación, algunos autores han dejado en el tintero la exploración de los desafíos de seguridad cibernética de la información de las PYMES que adoptan tecnologías de digitalización. Tampoco se ha investigado de manera exhaustiva el retorno de la inversión en términos económicos, es decir, el análisis detallado de los beneficios financieros que las empresas pueden obtener al implementar estas tecnologías.

Tampoco, se ha explorado las relaciones que no se observan entre temas relevantes en la Figura **11.** *Relación de oportunidad de investigación*, tales como los factores de impulso para la transformación digital y las PYMES, tampoco los casos de estudio relacionados con el alistamiento y las barreras que impiden la adopción de las tecnologías de la Industria 4.0. además no se ha estudiado la relación de los sectores en la implementación de las innovaciones de la Manufactura Digital.

Por lo tanto, como resultado de esta revisión sistemática, se ha identificado una oportunidad de investigación especifica: analizar la relación entre las PYME del sector agroalimentario y los Modelos de Madurez. Esta relación podría aportar una comprensión más profunda sobre la implementación de la Industria 4.0 en este sector particular, ofreciendo valiosas perspectivas para futuros estudios.

2. Definición del constructo de la investigación

Figura 12. *Desarrollo del capítulo 2.*



Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

La Figura 12. *Desarrollo del capítulo 2.* muestra cómo se desarrollará el constructo de investigación. En este capítulo, se profundizará en la compren6sión del constructo central de la investigación, que se centra en el nivel de preparación y adopción de tecnologías de la Industria 4.0 por parte de las pequeñas y medianas empresas del sector agroalimentario en Aldana, Nariño, así como los factores que definen su nivel de madurez en la implementación de la Manufactura Digital, la metodología de diseño del modelo y sus bases teóricas.

En el marco de la revisión del estado del arte sobre la implementación de la Industria 4.0 (I4.0) en las PYMES, surge una oportunidad de investigación prometedora y relevante para el sector agroalimentario. Esta oportunidad de investigación se centra en la necesidad de desarrollar un modelo de madurez específico para las pequeñas y medianas empresas del sector agroalimentario que permita evaluar su nivel de preparación y adopción de tecnologías de la Industria 4.0.

En el contexto del departamento de Nariño, caracterizado por la baja competitividad de sus PYMES del sector agroalimentario (Competitividad, 2023), la oportunidad de investigación identificada adquiere aún mayor relevancia. La implementación de la Industria 4.0 podría representar una estrategia clave para mejorar la competitividad de estas empresas. Sin embargo, la falta de un modelo de madurez específico adaptado a las necesidades y características del sector agroalimentario en Nariño impide una evaluación adecuada de su nivel de preparación y adopción de tecnologías I4.0. Por lo tanto, el desarrollo de un

modelo de madurez personalizado se convierte en una herramienta esencial para abordar esta problemática y promover la transformación digital de las PYMES agroalimentarias en el departamento.

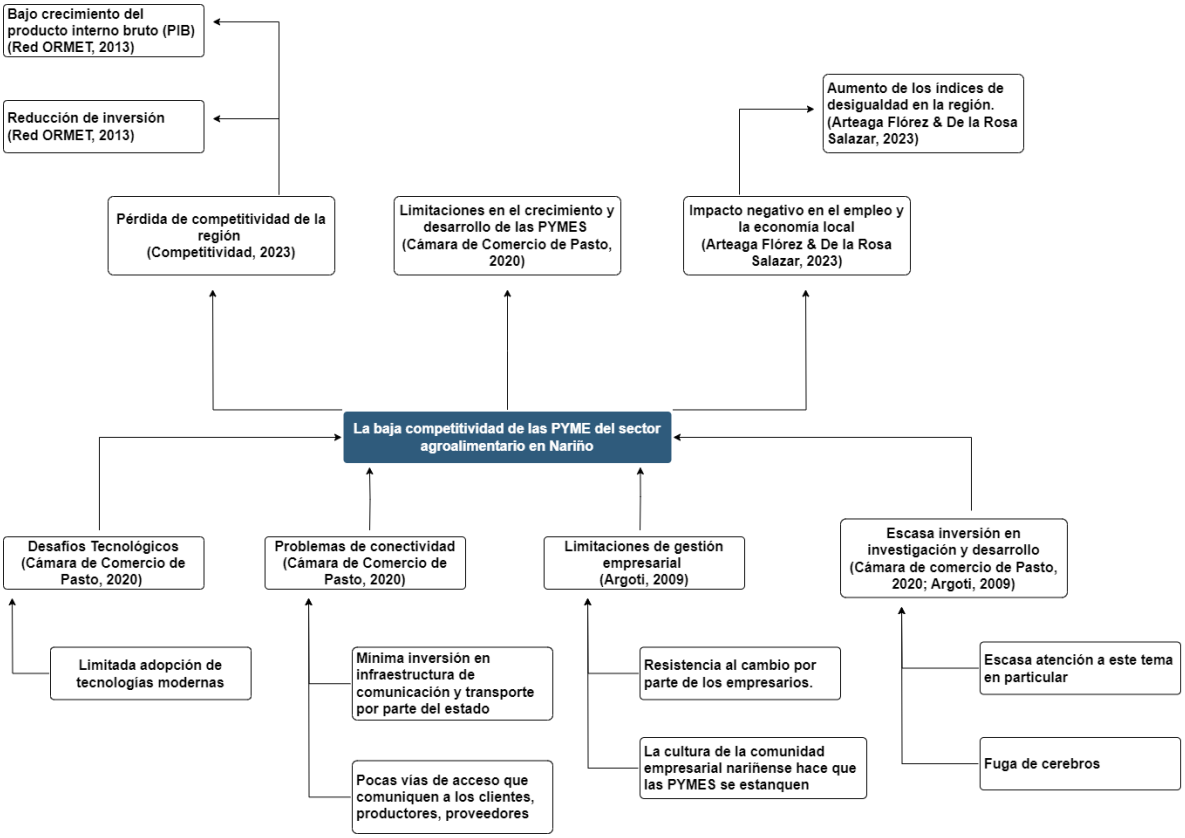
La baja competitividad de las PYMES del sector agroalimentario en Nariño se convierte en el eje fundamental y motivación para realizar esta investigación. Según la Cámara de Comercio de Pasto (2020), esta situación se debe a varios factores. Por un lado, estas organizaciones enfrentan desafíos tecnológicos que las colocan en una posición desventajosa frente a sus competidores en el centro del país. Además, los problemas de conectividad contribuyen a la escasa comunicación y cobertura de movilidad en ciertas áreas del departamento. Estas limitaciones en la infraestructura de transporte y comunicación, a su vez, obstaculizan el aumento de la competitividad (Cámara de Comercio de Pasto, 2020). Según Argoti (2009), otras de las causas de esta problemática radica en las limitaciones en gestión empresarial. Existe una falta de capacidad y conocimiento en gestión empresarial, así como deficiencias en la dirección efectiva de las empresas. Además, se observa una escasa inversión en investigación y desarrollo también incide en la baja competitividad.

Como resultado de esta problemática, se evidencia una pérdida de competitividad en comparación con otras regiones, tal como se refleja en la posición del departamento de Nariño en el índice de competitividad departamental 2023 (Competitividad, 2023). Además se observan limitaciones en el crecimiento y desarrollo de las PYMES agroalimentarias (Cámara de Comercio de Pasto, 2020), lo que tiene un impacto negativo en el empleo y la economía local (Arteaga Flórez & De la Rosa Salazar, 2023). Estos factores, combinados con la escasa inversión en investigación y desarrollo, contribuyen a perpetuar la situación de baja competitividad en el sector agroalimentario en Nariño.

La Figura 13. *Árbol de problemas*, representa gráficamente la relación entre las causas identificadas en la parte inferior de la ilustración y las consecuencias derivadas de la baja competitividad de las PYMES del sector agroalimentario en Nariño, ubicadas en la parte superior. Esta representación visual subraya la complejidad de los desafíos que enfrentan estas empresas y resalta la necesidad de estrategias efectivas para abordar sus deficiencias y promover su desarrollo sostenible.

En este sentido, es esencial comprender a fondo conceptos como Industria 4.0, madurez digital, entre otros y explorar herramientas específicas que pueden servir como vehículos para la transformación digital y el fortalecimiento de la competitividad en el sector agroalimentario. A continuación, se procederá a definir y caracterizar estos conceptos y herramientas, estableciendo así una base sólida para la construcción del modelo de madurez que permitirá evaluar el nivel de preparación y adopción de las tecnologías de la I4.0 en las PYMES de la región. La Figura 13. *Árbol de problemas*, muestra la relación lógica en la construcción de este capítulo.

Figura 13. *Árbol de problemas*



Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

2.1 Planteamiento del Problema

El contexto actual de globalización, los cambiantes escenarios del mercado y el continuo avance tecnológico dejan a las PYME en una posición vulnerable para sobrevivir en un mercado competitivo. En Colombia, estas pequeñas y medianas empresas representan aproximadamente el 90% del total de las empresas nacionales (Confecámaras, 2021). En Nariño, la situación se mantiene, sin embargo las PYME del sector agroalimentario afrontan una baja significativa de competitividad a nivel nacional, lo que impacta negativamente su tasa de supervivencia (Competitividad, 2023). En este contexto, la implementación de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 emerge como una oportunidad clave para mejorar la competitividad de las PYME en Nariño. Sin embargo, el camino hacia este cambio no es sencillo y comienza por comprender el nivel de madurez en la adopción de estas tecnologías en las PYMES. Por consiguiente, se destaca la necesidad imperativa de evaluar y comprender el grado de preparación y adopción de las tecnologías de la Industria 4.0 por parte de las PYMES en Nariño, con un enfoque particular en el municipio de Aldana.

La pregunta planteada para este problema sería:

¿Cuál es el nivel de preparación y adopción de tecnologías de la Industria 4.0 por parte de las PYME del sector agroalimentario en Aldana, Nariño, y qué factores definen su madurez en la implementación de la Manufactura Digital?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de madurez que evalúe y defina el nivel de preparación y adopción de tecnologías de la Manufactura Digital en las PYMES del sector agroalimentario del municipio de Aldana, Nariño brindando una comprensión detallada de los aspectos que influyen en su madurez en la implementación de estas tecnologías.

2.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión sistemática de literatura que hablen sobre metodologías de implementación de las herramientas de la Manufactura Digital.
- Realizar un diagnóstico detallado del nivel de madurez de las PYME en Nariño en términos de adopción de tecnología de la Industria 4.0.
- Evaluar las barreras y desafíos específicos que enfrentan las PYME en Aldana para la implementación de la Industria 4.0, considerando factores como la infraestructura, la formación del personal y la inversión en tecnología.
- Diseñar un modelo de madurez que permita medir y categorizar el nivel de preparación de las PYME para la adopción de tecnologías de la Industria 4.0, considerando múltiples dimensiones y factores.
- Aplicar el modelo de madurez construido como un piloto de alguna de las PYME en Aldana, con el propósito de validar el modelo propuesto.

2.3 Industria 4.0

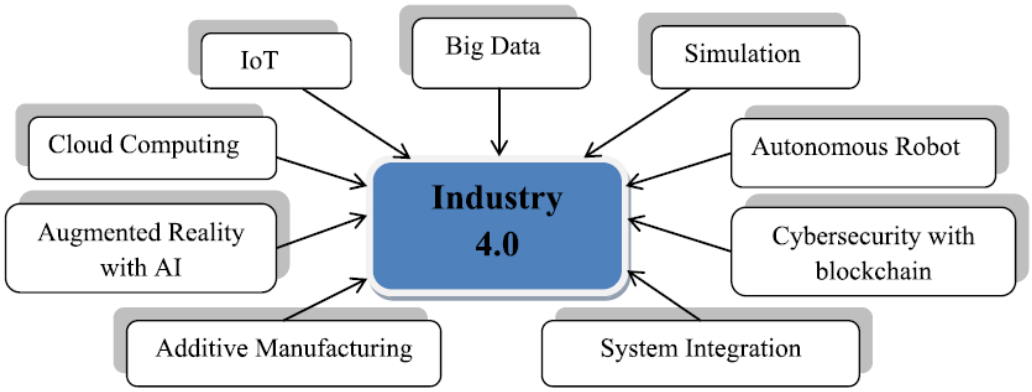
La Industria 4.0 (I4.0), también conocida como Manufactura Digital o *Smart Manufacturing* es un término acuñado por el gobierno alemán en 2011 como estrategia para transformar el tradicional sistema de producción (Han & Trimi, 2022) mediante la integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos de fabricación y producción (Rivillas Mejia, 2022). Esta cuarta revolución industrial no solo implica la implementación de innovaciones tecnológicas, sino también la adopción de nuevos modelos de negocio y la creación de valor en todos los niveles organizativos, desde el operativo hasta el gerencial.

En ese sentido, la I4.0 se concibe como la capacidad de una organización para generar mayor valor para sus clientes o usuarios finales a través del aprovechamiento de datos que pueden ser organizados, sintetizados y analizados (Amaral & Peças, 2021b).

Según (Marrucci et al., 2023) el concepto I4.0 implica cambiar los paradigmas comerciales tradicionales por modelos más inteligentes, donde existe una interconexión entre humanos y máquinas mediante el uso de tecnologías (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). Aunque el debate académico sobre la Industria 4.0 se ha centrado principalmente en grandes empresas manufactureras (Agostini & Filippini, 2019; Agostini & Nosella, 2019; Rialti et al., 2020) es importante reconocer que las tecnologías de la I4.0 tienen un potencial significativo más allá de la producción en masa, abarcando la diversidad de la industria manufacturera (Garzoni et al., 2020).

Dossou et al (2022b) identifican nueve (9) pilares fundamentales para la construcción de la Industria 4.0 dentro de las organizaciones: Internet de las cosas (IoT), computación en la nube, fabricación aditiva, ciberseguridad con *blockchain*, realidad aumentada con inteligencia artificial (IA), *big data*, integración de sistemas, simulación y robots (Ver Figura 14. *Pilares de la Industria 4.0*). A través de estos conceptos las compañías pueden desarrollar sus modelos de valor para los clientes y ser más competitivas (Pfeifer, 2021).

Figura 14. *Pilares de la Industria 4.0*



Fuente: Tomado de “Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges” por Kumar, R., et al, 2020, Journal of cleaner production, 275, 124063.

El principal objetivo de la Industria 4.0 es favorecer la automatización y la flexibilidad en la cadena de producción, permitir la optimización del proceso de producción mediante la integración del Internet de las Cosas (IoT) dentro de las fábricas inteligentes, facilitar y estimular la interacción entre humanos y máquinas, pero también favorecer el seguimiento de nuevos tipos de servicios y modelos de negocio (Ricci et al., 2021).

2.3.1 Transformación digital

La transformación digital puede definirse como el método en que las tecnologías digitales se integran a las prácticas empresariales dentro de una organización (Gamache et al., 2020). Esto constituye el proceso de adaptación hacia la Industria 4.0 para las compañías. Implica la integración de las innovaciones tecnológicas en todas las áreas de la empresa, lo que cambia radicalmente la forma en que la empresa opera y ofrece valor a los clientes (Tang, 2021).

La transformación digital abarca las modificaciones organizativas, operativas y culturales de una empresa o industria mediante la integración de técnicas, competencias y procesos digitales (Kazei & Sengupta, 2022). Es un tipo de modificación empresarial que tiene como objetivo lograr un crecimiento rentable y ahorrar en los resultados finales mediante el uso de tecnologías digitales. También consiste en reasignar la forma en que una organización interactúa con los clientes y la forma en que la tecnología, las personas y los procesos se utilizan para cambiar radicalmente el rendimiento empresarial (Patro & Raghunath, 2021).

2.4 Madurez digital

La madurez digital se refiere al nivel de preparación y capacidad de una organización para adaptarse e implementar cambios digitales a fin de seguir siendo competitiva en el mercado (Ernszt et al., 2023a). Varios factores pueden obstaculizar la mejora de la madurez digital, como la cultura organizacional, los elementos humanos y la calidad de la digitalización. Alcanzar la madurez digital implica comprender los objetivos de la transformación digital, evaluar la eficacia de los cambios e implementar un conjunto de medidas interrelacionadas (Ershova & Enkova, 2023). Las empresas con las características de una organización que aprende tienden a alcanzar un mayor nivel de madurez digital. El proceso de madurez digital implica la adopción de tecnologías avanzadas, el desarrollo de la infraestructura digital, la revisión de los enfoques de gestión de la educación y la transformación de los propios empleados. Supervisar y medir la base tecnológica para gestionar la madurez digital es crucial para el éxito empresarial (Al Mazroui et al., 2023; Prokhorova & Gureev, 2023).

2.4.1 Factores de Madurez digital

La madurez digital de una organización se ve influenciada por una serie de factores y aspectos clave. Estos incluyen la cultura organizacional y los elementos humanos (Ernszt et al., 2023b). La presencia de una organización que fomenta el aprendizaje y exhibe características como la capacidad de anticipar y predecir cambios, enfocarse en los impactos a largo plazo y promover el éxito personal de los empleados, puede contribuir significativamente a alcanzar niveles más altos de madurez digital (Rotem & Fisher, 2022).

Además, la madurez digital de una organización está intrínsecamente relacionada con su capacidad de ser resiliente ante eventos disruptivos, como la pandemia del COVID-19.

Factores como la disponibilidad de una infraestructura tecnológica sólida, la agilidad de la toma de decisiones, la capacidad de monitorear la situación y el continuo desarrollo de la alfabetización digital de la fuerza laboral son críticos para mejorar tanto la resiliencia organizacional como la madurez digital (Mario Effendy & Arquisola, 2022).

Los rasgos de liderazgo transformacional, como la influencia idealizada y la motivación inspiradora, también desempeñan un papel significativo en la promoción de la madurez digital (Zentner et al., 2022). Además, de las competencias gerenciales, que incluyen la educación en gestión y el desarrollo de habilidades digitales, tienen un impacto positivo en la madurez del modelo de negocio digital de las empresas (Thordsen & Bick, 2023). Finalmente, la implementación efectiva de plataformas tecnológicas, como la infraestructura de TI, las herramientas de colaboración y las plataformas de cadena de valor, puede actuar como un catalizador fundamental para impulsar la madurez digital de una organización.

2.5 Modelos de Madurez

Los modelos de madurez son herramientas esenciales para evaluar el grado de desarrollo, competencia o sofisticación en un área específica, como los procesos organizacionales, las prácticas comerciales o las tecnologías (Stocker et al., 2022). Estos modelos definen una serie de niveles o etapas de madurez que representan diferentes estados de evolución en el dominio evaluado, desde un grado inicial o básico hasta un nivel avanzado u óptimo (Mittal, Khan, et al., 2018). Cada etapa está acompañada de criterios específicos que ayudan a determinar el nivel de desarrollo alcanzado por una organización o procesos.

En el contexto de la I4.0 se han desarrollado y aplicado modelos de madurez con el propósito de evaluar la preparación y la madurez de las organizaciones para adoptar las prácticas de la Manufactura Digital. Estos modelos proporcionan una comprensión del estado actual de las empresas y ayudan a identificar las brechas y las barreras en su camino hacia la digitalización (Schmitt et al., 2020).

Existen dos concepciones principales de modelos madurez. Según Kluth et al. (2014), un modelo de madurez se define como una representación simplificada de la realidad utilizada para evaluar la calidad de los procesos organizacionales, describiendo diferentes etapas de madurez. Por otro lado, según Kohlegger et al. (2009), un modelo de madurez conceptualiza las fases de cambio en la capacidad cuantitativa o cualitativa en aumento de un elemento de maduración, con el propósito de evaluar su progreso en áreas de enfoque definidas.

Los modelos de madurez se aplican en la Industria 4.0 para evaluar la preparación y el nivel de madurez de las empresas en la adopción de tecnologías y prácticas. Estos modelos se centran en evaluar diversas dimensiones, como las personas, la cultura, la organización, los recursos, los sistemas de información, los procesos empresariales, la tecnología, los productos y los servicios inteligentes (Susanto et al., 2023). Utilizan

diferentes enfoques analíticos, incluyendo métodos descriptivos y técnicas más avanzadas, como la jerarquización analítica y los enfoques basados en sistemas de expertos (Maristela Reis Moraes & Araújo de Souza Júnior, 2023). La aplicación de modelos de madurez permite a las empresas identificar brechas y barreras en su proceso de transformación y desarrollar estrategias para abordarlas de manera efectiva (Hajoary et al., 2023). También ayuda a las empresas a medir su nivel al adoptar tecnologías de la industria 4.0 e identificar áreas de mejora (Das et al., 2023; AlMarri & Bouras, 2023).

Los modelos de madurez suelen estar compuestos por varios elementos clave que permiten evaluar y medir el grado de desarrollo en un área específica. Entre los componentes más destacados se encuentran los niveles y las dimensiones. Para Ortiz (2012), los modelos de madurez deben incluir los siguientes elementos o características estándar:

1. Contar con una cantidad definida de niveles de madurez.
2. Asignar un nombre descriptivo a cada nivel.
3. Proporcionar una descripción genérica de cada nivel.
4. Establecer un conjunto de dimensiones.
5. Incluir con conjunto de elementos o actividades asociadas a cada área de proceso.
6. Ofrecer una descripción detallada de cada actividad, incluyendo información sobre cómo llevarla a cabo.

Por lo que a continuación, se presenta la definición de algunos aspectos comunes que se encuentran en la mayoría de los modelos de madurez.

2.5.1 Niveles de madurez

Los modelos de madurez definen una serie de niveles que representan diferentes estados de evolución en el dominio evaluado. Estos niveles suelen ir desde un grado inicial o básico hasta un nivel avanzado u óptimo. Cada nivel está acompañado de criterios específicos que ayudan a determinar el grado de desarrollo alcanzado por una organización o proceso.

2.5.2 Dimensiones

Otro componente importante de los modelos de madurez son las dimensiones, que representan los aspectos o áreas de interés que se evalúan dentro de la organización. Estas dimensiones pueden abarcar una amplia gama de aspectos, como las personas, la cultura organizacional, la infraestructura tecnológica, los procesos empresariales, entre otros. Identificar y evaluar estas dimensiones es fundamental para comprender la madurez global de una organización en relación con la adopción de tecnologías y prácticas específicas.

2.5.3 Modelos de madurez en la literatura

En la literatura, se encuentran una variedad de modelos de madurez diseñados para abordar diferentes contextos, desafíos y particularidades específicas de sectores industriales y organizaciones. Estos modelos han sido desarrollados con el objetivo de comprender y mejorar diversos aspectos de las empresas, desde la gestión de procesos hasta la adopción de tecnologías emergentes. Las limitaciones y alcances de cada modelo varían según su enfoque y los requisitos del sector en el que se aplican, lo que destaca la importancia de evaluar cuidadosamente su idoneidad y relevancia para un contexto particular. Además, es fundamental considerar las características específicas de las organizaciones y los sectores industriales al seleccionar o adaptar un modelo de madurez, ya que estas pueden influir significativamente en su efectividad y aplicabilidad.

Una revisión crítica de los modelos de madurez de la fabricación revela que los modelos existentes varían en cuanto a su aplicabilidad y sus inconvenientes (Vance et al., 2023). Si bien algunos modelos se centran en métodos descriptivos, otros incorporan enfoques analíticos avanzados, como los métodos basados en reglas difusas, basados en el conocimiento y en sistemas expertos (Mo et al., 2023). Entre las dimensiones que se suelen evaluar en estos modelos se incluyen las personas, la cultura, la organización, los recursos, los sistemas de información, los procesos empresariales y la tecnología inteligente (Kim, 2023).

Para (Galindo, 2019a) los modelos abarcan diversas dimensiones, muchas de las cuales se superponen entre varios modelos, lo que sugiere su importancia al momento de establecer un nuevo modelo. Sin embargo, la selección de estas dimensiones dependerá del alcance específico del modelo en cuestión.

Para comprender plenamente el panorama de los modelos de madurez digital, es crucial examinar su evolución a lo largo del tiempo y los hitos más relevantes en su desarrollo. En este sentido, se presenta una línea de tiempo que resume los principales acontecimientos y trabajos relevantes en este campo:

Tabla 12. *Línea de tiempo con los principales acontecimientos en el campo de los modelos de madurez*

Año	Fuente bibliográfica	Hito
1993	(Lorenzo, 2016)	Desarrollo del modelo de madurez de capacidades (CMM) por la Universidad de Carnegie-Mellon. Este modelo marcó el inicio de la conceptualización de la madurez en la gestión de procesos organizacionales y se convirtió en un marco de referencia para múltiples modelos posteriores.
2011	(Lorenzo, 2016)	Integración del modelo CMM en CMMI (Capability Maturity Model Integrated), consolidando diferentes enfoques de madurez en un solo modelo, principalmente en la industria del software.
2011	(Berna & Bell, 2011; O'Hea, 2011)	Presentación del modelo McKinsey, Digital Capability Framework (DCF) del Innovation Value Institute (IVI) y la Matriz de Madurez Digital del MIT y Cappergini. Estos modelos proporcionan métricas y guías para evaluar y mejorar la madurez digital en las organizaciones.

2014	(Gutsche et al., 2014)	Estudio de KMPG sobre reacciones de diferentes industrias a la Transformación Digital. Este estudio identificó cinco aspectos en las que las empresas deben centrarse para alcanzar la Transformación Digital e hizo hincapié en la importancia de la alfabetización digital.
2015	(Back & Berghaus, 2015; Catlin et al., 2015; Lichtblau et al., 2015)	Desarrollo de modelos para la Industria 4.0 donde se elaboraron varios modelos para abordar la transformación digital en el contexto de la Industria 4.0. Estos modelos evalúan la madurez digital en las empresas y proporcionan herramientas y estrategias para la adopción de tecnologías digitales.
2016	(Aleem et al., 2016; Back & Berghaus, 2015; Gill & VanBoskirk, 2016; Greif et al., 2016; Kane et al., 2016)	Presentación de modelos de Forrester, Price Waterhouse Cooper y MIT con Deloitte. Estos modelos proporcionan métricas y estrategias para la transformación digital de las organizaciones.
2017	(Boström & Celik, 2017; Comuzzi & Patel, 2017; Karltorp, 2017; Newman, 2017; Parviainen et al., 2017)	Desarrollo de modelos para abordar la transformación digital en diversos contextos que proporcionan herramientas y estrategias para evaluar y mejorar la madurez digital de las organizaciones.
2018	(Acevedo, 2018)	Presentación del modelo de madurez digital del Plan Vive Digital en Colombia una iniciativa del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones e INNpulsa Colombia para promover la digitalización de las Mipymes colombianas.
2019	(Álvarez Marcos et al., 2019)	Se publicó un modelo para definir el índice de madurez digital de la prensa española, que evalúa el nivel de digitalización de los medios que no son nativos digitales y proporciona recomendaciones para la transformación digital.

Fuente: Elaboración propia adaptado de “Modelos de madurez digital en PYMES – caso de estudio de una pyme de telecomunicaciones de Colombia” por Zorro, E., 2019, Universidad Nacional de Colombia.

2.6 Análisis de los Modelos de Madurez enfocados a PYMES

En el capítulo anterior, se describió la revisión sistemática de literatura que sirvió como base para identificar la oportunidad de investigación. Durante este proceso, además de encontrar referencias clave para el actual proyecto de investigación, también se hallaron numerosas revisiones sistemáticas que analizaban diferentes modelos de madurez. Estas revisiones presentan una amplia gama de modelos, desde enfoques más generales hasta modelos específicos para sectores o tipos de empresas.

Dado que el objetivo de este estudio es desarrollar un modelo de madurez para el sector agroalimentario en el contexto de PYMES en Nariño, se centró en analizar e identificar los modelos de madurez que se dirigían específicamente a pequeñas y medianas empresas, ya que el tamaño de la organización es un factor crítico para la implementación de nuevas tecnologías (Amaral & Peças, 2021a). De los modelos identificados en las revisiones sistemáticas, se seleccionaron aquellos que se adaptaban mejor a nuestro contexto y relevancia temática.

Para obtener un entendimiento más profundo de estos modelos, se siguió un proceso de caracterización centrado en responder preguntas fundamentales como ¿cómo se describe

el modelo de madurez? ¿cómo se construyó? ¿cuáles son sus aplicaciones prácticas? También se analizó las dimensiones clave utilizadas en cada modelo y el número de niveles de madurez.

Aunque el número total de modelos enfocados en las PYMES encontrados fueron 16, estos constituyen una base sólida y significativa para nuestro análisis. La Tabla 13, presenta un resumen de los modelos de madurez identificados, destacando su número de niveles, dimensiones y una descripción.

2.6.1 ¿Cómo se construyeron los modelos de madurez (MM)?

Cada modelo se construyó de una manera única, pero existen ciertas similitudes que resultan interesantes considerar. Por ejemplo Blatz et al., (2018), Amaral & Pecas, (2021), Methavitakul & Santiteerakul Salinee, (2018), Mittal, Romero et al., (2018), Ávila Bohórquez & Gil Herrera, (2022), Castelo-Blanco et al., (2022), Chonsawat & Sopadang, (2019), Pan Nogueras et al., (2022), Perea Muñoz et al., (2022), Rahamaddulla et al., (2021) y Büyük et al., (2021) utilizaron la revisión exhaustiva de la literatura como punto de partida para desarrollar sus respectivos modelos de madurez.

Algunos de estos autores analizaron los modelos existentes y eligieron el que mejor se adaptaba a su problema específico otros, en cambio, identificaron un vacio en la investigación y diseñaron un nuevo modelo para llenarlo. Además algunos autores, como Berghaus & Back, (2016), Gil & Vanboskir, (2016) y Brozzi et al., (2021), desarrollaron sus modelos a partir del trabajo de otros, realizando mejoras o adaptaciones según sus necesidades.

Por otro lado, Ganzarain & Errasti, (2016) construyeron su modelo de madurez a través de una metodología colaborativa que involucra a la industria en el proceso de diseño, desde el principio hasta el final.

Tabla 13. *Modelos de Madurez*

MM No.	Autores	Descripción del modelo.	Dimensiones clave.	Niveles de madurez.
MM1.	(Blatz et al., 2018)	El modelo de madurez se enfoca en la evaluación de la madurez digital de las pymes, fue desarrollado basándose en el estado actual de investigación en el tema, que luego se transfirió a un cuestionario.	- Estrategia y liderazgo. - Cultura organizacional. - Infraestructura. - Manejo de datos. - Procesos y operaciones. - Producto.	**Nivel 1:** Inicial. **Nivel 2:** Incipiente. **Nivel 3:** Plan de transformación digital.
MM2.	(Amaral & Pecas, 2021)	Se propone un modelo de madurez holístico que considere todas las dimensiones de la Industria 4.0 esquematizadas dentro de un marco que permita la interrelación entre ellas	- Tecnología. - Procesos productivos. - Personas. - Organización. - Productos inteligentes	**Nivel 0:** Incompleto. **Nivel 1:** Iniciación. **Nivel 2:** Gestión. **Nivel 3:** Establecido. **Nivel 4:** Predecible. **Nivel 5:** Optimización.

MM3.	(Ganzarain & Errasti, 2016)	Modelo de proceso por etapas para guiar a las empresas en su proceso de visión y estrategia para la Industria 4.0. El objetivo del modelo es orientar y capacitar a las empresas para identificar nuevas oportunidades de diversificación en áreas dentro de la Industria 4.0	- Visualizar la Industria 4.0. - Hoja de Ruta 4.0. - Implementar la Industria 4.0.	**Nivel 1:** Inicial. **Nivel 2:** Administrado. **Nivel 3:** Definido. **Nivel 4:** Transformado. **Nivel 5:** Modelo de Negocio detallado.
MM4.	(Methavitakul & Santiteerakul Salinee, 2018)	Presentan las dimensiones o factores necesarios para evaluar la madurez entorno a la preparación de la Industria 4.0 de las PYMES tailandesas.	- Estrategia. - Tecnología. - Operación y manufactura. - Cadena de suministro. - Empleados. - Producto. - Cliente.	**Ninguno**
MM5.	(Berghaus & Back, 2016)	Se derivaron cinco etapas de madurez a partir de los datos empíricos del estudio, que destacan diferentes niveles de progreso de la transformación digital, desde la afinidad digital hasta la integración del análisis de datos avanzados en los procesos empresariales.	- Experiencia del cliente. - Innovación en el producto. - Estrategia. - Organización. - Proceso de digitalización. - Colaboración. - Información tecnológica. - Cultura y experiencia. - Administración de la transformación.	**Nivel 1:** Promover y soportar. **Nivel 2:** Crear y construir. **Nivel 3:** Comprometerse a la transformación. **Nivel 4:** Procesos centrados en el usuario. **Nivel 5:** Empresa impulsada por datos.
MM6.	(Gill & Vanboskirk, 2016)	El modelo de madurez está orientado a medir cómo las empresas utilizan lo digital para impulsar sus estrategias competitivas y mejorarlas, así como permitir experiencias superiores para los clientes y crear agilidad operativa.	- Cultura. - Tecnología. - Organización. - Información.	**Nivel 1:** Escépticos. **Nivel 2:** Adaptadores. **Nivel 3:** Colaboradores. **Nivel 4:** Diferenciadores.
MM7.	(Mittal, Romero, et al., 2018)	El modelo de madurez está enfocado a apoyar a las pequeñas y medianas empresas en su transformación digital y adopción del paradigma de la Industria 4.0 hacia la manufactura inteligente	- Financiera. - Personas. - Estrategia. - Procesos. - Productos.	**Nivel 1:** Novato. **Nivel 2:** Principiante. **Nivel 3:** Aprendiz. **Nivel 4:** Intermedio. **Nivel 5:** Experto.
MM8.	(Brozzi et al., 2021)	El enfoque de este modelo de madurez se centra en la evaluación del nivel de preparación digital de las empresas a través de las dimensiones. El modelo utiliza una escala de Likert de cinco puntos para la evaluación. Además el modelo incorpora indicadores clave de preparación (KPI) para proporcionar información	- Estrategia. - Requerimientos tecnológicos. - Conciencia. - Competencia.	**Nivel 1:** Principiantes digitales. **Nivel 2:** Empresa en transición. **Nivel 3:** Líderes en rendimiento.

		adicional que permita una mejor interpretación del nivel de preparación digital.		
MM9.	(Ávila Bohórquez & Gil Herrera, 2022)	El enfoque de este modelo de madurez es establecer un marco para evaluar el nivel de madurez de la Industria 4.0 en las PYMES manufactureras. El modelo está diseñado para ayudar a las empresas a medir y mejorar su adopción de tecnologías y prácticas relacionadas con la cuarta revolución industrial.	- Servicio. - Operaciones. - Calidad. - Productos. - Información documentada. - Big Data. - Liderazgo y estrategia. - Comunicación. - Cultura y personas.	**Nivel 1:** No inicio. **Nivel 2:** Inicio. **Nivel 3:** Aplicación parcial. **Nivel 4:** Alta aplicación. **Nivel 5:** Líderes en Industria 4.0.
MM10	(Castelo-Branco et al., 2022)	El enfoque de este modelo se centra en la medición y evaluación de la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 en empresas portuguesas de diversos sectores económicos, más allá del manufacturero.	- Estrategia de tecnología de la información (TI) y la seguridad cibernética. - Facilitadores. - Fábrica inteligente. - Propuesta de valor. - Experiencia del cliente.	**No menciona**
MM11	(Chonsawat & Sopadang, 2019)	El modelo de madurez descrito se centra en evaluar la preparación y madurez de las empresas para adoptar las tecnologías relacionadas con la Industria 4.0. Esta especialmente enfocado a las PYMES.	- Fabricación y operaciones. - Capacidad del personal. - Procesos impulsados por la tecnología. - Soporte digital. - Estrategia empresarial y organizacional.	**Nivel 1:** Principiante. **Nivel 2:** Intermedio. **Nivel 3:** Experto. **Nivel 4:** Sistema experto.
MM12	(Pan Nogueras et al., 2022)	El enfoque de este modelo de madurez se centra en proporcionar herramientas de autoevaluación específicas para PYMES que buscan avanzar hacia la Industria 4.0.	- Estrategia y liderazgo. - Estructura organizacional. - Colaboración a lo largo de la cadena de valor. - Sistemas de información. - Recursos tecnológicos. - Productos.	**Nivel 0:** Preparación cero. **Nivel 1:** Sensibilización. **Nivel 2:** Apreciación de conocimientos. **Nivel 3:** Rompiendo silos. **Nivel 4:** Adaptabilidad.
MM13	(Perea Muñoz et al., 2022)	El modelo de madurez tienen un enfoque práctico orientado a ayudar a las PYMES a avanzar hacia la implementación de la Industria 4.0 mediante el desarrollo de un plan de acción que esté integrado en su propia estrategia.	- No menciona	**No menciona**
MM14	(Pirola et al., 2019)	El modelo de madurez se enfoca en evaluar el nivel de preparación digital de las PYMES con un énfasis particular en la industria manufacturera. Este modelo busca proporcionar una	- Estrategia. - Personas. - Procesos. - Integración tecnológica.	**Nivel 1:** Inicial. **Nivel 2:** Intermedio. **Nivel 3:** Formulador. **Nivel 4:** Implementar. **Nivel 5:** Monitorear.

		herramienta para medir y analizar la disposición de las pymes para adoptar tecnologías y prácticas relacionadas con la Industria 4.0.		
MM15	(Rahamaddulla et al., 2021)	El modelo de madurez se enfoca en ayudar a las PYMES superar las barreras de implementación de la Industria 4.0 proporciona una herramienta que permita evaluar el nivel de preparación de las pequeñas empresas para la I4.0 y establecer un plan para su adopción.	- Administración. - Máquinas. - Método. - Personas.	**Nivel 1:** Principiante. **Nivel 2**: Neófito. **Nivel 3**: Aprendiz. **Nivel 4**: Experto. **Nivel 5**: Líder.
MM16	(Büyük et al., 2021)	Este modelo de madurez se centra en crear un modelo de evaluación de madurez digital para empresas que desean prepararse para el futuro mediante la evaluación de sus competencias en Agricultura inteligente.	- Gestión de datos. - Fábrica inteligente. - Empleados. - Instalación inteligente. - Tecnología. - Estrategia y gestión.	**Nivel 1:** Principiante. **Nivel 2:** Intermedio. **Nivel 3:** Experimentado. **Nivel 4:** Experto. **Nivel 5:** Líder.

Fuente: Elaboración propia.

Otros autores como Pirola et al., (2019) utilizaron una metodología diferente utilizando múltiples casos de estudios para crear así con la experiencia brindada por la práctica un modelo de madurez que se ajuste a estas situaciones en particular.

Por autores como Röglinger & Pöppelbuß, (2011) desarrollaron un marco teórico para la construcción de modelos de madurez aplicables a diversos contextos organizacionales. Ellos proponen una serie de principios de diseños clave que garantizan que los modelos de madurez sean útiles, aplicables y relevantes para los entornos específicos donde se implementan. Este marco metodológico incluye aspectos esenciales como: (i) Definición clara del propósito del modelo, donde se establece si el modelo será utilizado para diagnóstico, comparación, evaluación o mejora continua, (ii) Identificación de dimensiones y niveles de madurez, lo que permite evaluar distintos aspectos del proceso de transformación digital o de adopción tecnológica, (iii) Desarrollo de indicadores específicos para evaluar cada dimensión (iv) Validación del modelo en un entorno real para asegurar su aplicabilidad y consistencia en diferentes contextos.

Röglinger & Pöppelbuß, (2011), también destacan la importancia de alinear el modelo de madurez con las necesidades y objetivos estratégicos de las organizaciones para asegurar que su implementación contribuya a mejorar el desempeño empresarial. Además, enfatizan que un modelo de madurez efectivo debe ser flexible y adaptable, permitiendo modificaciones para ajustarse a diferentes sectores o industrias.

La construcción de modelos puede implicar diversos enfoques, como la revisión de literatura existente, la identificación de oportunidades para nuevos modelos, y la

colaboración con la industria para asegurar que el modelo sea práctico y relevante para el contexto actual.

2.6.2 ¿Cuáles son sus aplicaciones prácticas?

Los modelos de madurez identificados tienen aplicaciones prácticas en diversos contextos empresariales. Por ejemplo, algunos modelos se han utilizado para guiar a las empresas en su transición hacia la Industria 4.0, ayudando a identificar áreas clave para la mejora y a establecer hojas de ruta para la digitalización. En el ámbito de las PYMES, estos modelos han sido aplicados para evaluar el nivel de preparación tecnológico y para diseñar estrategias de adopción de nuevas tecnologías. Un caso de éxito notable es el uso de modelos de madurez para mejorar la eficiencia operativa en empresas manufactureras (Ávila Bohórquez & Gil Herrera, 2022). En estos casos, los modelos han permitido identificar procesos ineficientes y proponer soluciones basadas en tecnologías emergentes. Además, los modelos han demostrado ser útiles para fomentar la cultura de la innovación dentro de las empresas, facilitando la adaptación al cambio. Sin embargo, la aplicación práctica de estos modelos también presenta desafíos. Algunas empresas pueden encontrar dificultades para interpretar los resultados o para implementar las recomendaciones debido a limitaciones de recursos o conocimiento técnico. A pesar de estos desafíos, el uso de modelos de madurez sigue siendo una herramienta valiosa para guiar a las empresas en su camino hacia la digitalización y el crecimiento sostenible.

Los modelos de madurez tienen aplicación incluso en empresas que no tienen una producción repetitiva ni una línea de ensamblaje, como es el caso de la empresa donde se aplicó el modelo de madurez de Amaral & Pecas, (2021) (MM2), la aplicación se realizó a través de una encuesta estructurada según parámetros especificados según el objetivo del modelo. Aunque dicho modelo no fue desarrollado específicamente para este tipo de empresas manufactureras.

Los sectores donde se han desarrollado los modelos se encuentran en la Tabla 14, se muestra una clara influencia en que el sector donde más se ha aplicado este tipo de modelos es el sector manufacturero, pero existen algunas excepciones como el caso del modelo que se aplica al sector agroindustrial. En la Tabla 14. *Sector de aplicación modelos de madurez (MM)*, se continua con la enumeración del modelo de madurez (MM) presentados en la Tabla 13. *Modelos de Madurez*.

Tabla 14. *Sector de aplicación modelos de madurez (MM)*

Modelos de madurez	Sector industrial.
MM1, MM3, MM4, MM5, MM7, MM8, MM9, MM10, MM11, MM12, MM14, MM15	Sector Manufacturero
MM4, MM5, MM6, MM10, MM12	Tecnología de la información.
MM4, MM5,	Servicios Financieros.
MM10, MM12	Logística y cadena de suministro.

MM4	Sector energético.
MM2	Educación.
MM16	Agroindustrial.

Fuente: Elaboración propia.

Se determina, por lo tanto, que el sector en el que se aplicaron más modelos de madurez centrados en las PYMES es el sector manufacturero. La Tabla 14, muestra además que los sectores menos explorados son el sector energético, el de educación y el agroindustrial. Demostrando así que los modelos de madurez tienen una gran aplicación en casi todos los sectores industriales, que algunos se han limitado a explorar solamente ciertos tipos de áreas productivas.

3. Diseño del modelo de madurez

En esta sección se diseña y presenta un modelo de madurez para evaluar el nivel de preparación y adopción de tecnologías de Manufactura Digital en las PYMES del sector agroalimentario del departamento de Nariño. El diseño se fundamenta en la revisión de modelos de madurez existentes en la literatura y en un diagnóstico local que identifica barreras y desafíos específicos en la implementación de tecnologías relacionadas con la industria 4.0

El proceso siguió un enfoque de Modelo Integrador, que combina elementos clave de diversos modelos adaptados al contexto local para desarrollar un modelo de madurez ajustado a las necesidades y realidades de las pequeñas y medianas empresas del municipio de Aldana. Este enfoque metodológico garantiza que el modelo sea relevante, aplicable y específico para el sector agroalimentario de la región.

Par asegurar la solidez y aplicabilidad del modelo, se tomaron como referencia los principios de diseño de modelos de madurez propuestos por (Röglinger & Pöppelbuß, 2011), quienes destacan la importancia de:

- Definir un propósito claro para el modelo.
- Establecer dimensiones adecuadas que reflejen las áreas críticas de evaluación.
- Determinar niveles de madurez bien estructurados que describan la progresión del desarrollo organizacional.
- Incorporar indicadores específicos para evaluar objetivamente cada dimensión.

Además, se consideró la contextualización del modelo para garantizar su aplicabilidad en el sector agroalimentario, teniendo en cuenta las particularidades de las PYMES en Nariño, como sus limitaciones tecnológicas, organizativas y financieras.

El proceso incluyó la definición de dimensiones clave y niveles de madurez, cuyo objetivo es medir la disposición y el grado de incorporación de herramientas digitales en las empresas evaluadas. Para cada dimensión, se establecieron criterios de evaluación que permiten una medición precisa del nivel de madurez alcanzado. Finalmente, el modelo propuesto se presenta mediante un diagrama conceptual que facilita su comprensión y aplicación en las empresas analizadas.

La Figura 15. *Metodología para el Diseño del Modelo de Madurez.*, ilustra la metodología empleada para diseñar este modelo, abarcando tanto los fundamentos teóricos como la aplicación práctica del mismo.

Figura 15. *Metodología para el Diseño del Modelo de Madurez.*

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Enfoque metodológico

El diseño del modelo de madurez para evaluar la preparación y adopción de tecnologías de Manufactura Digital en las PYMES agroalimentarias del departamento de Nariño se fundamenta en un enfoque teórico-práctico que integra la revisión de la literatura académica con la aplicación práctica de conceptos en el contexto local. Este enfoque es adecuado para garantizar la validez y aplicabilidad del modelo en un entorno empresarial específico, como el del municipio de Aldana, donde las condiciones económicas, tecnológicas y organizativas presentan características particulares.

Según Röglinger & Pöppelbuß, (2011), un modelo de madurez debe basarse en una combinación de conocimiento teórico y validación práctica para asegurar su eficacia en la toma de decisiones estratégicas y operativas. La literatura establece que los enfoques teóricos permiten definir marcos conceptuales sólidos, mientras que la validación práctica asegura que el modelo sea adaptable y funcional en el contexto de aplicación (Schumacher et al., 2016a).

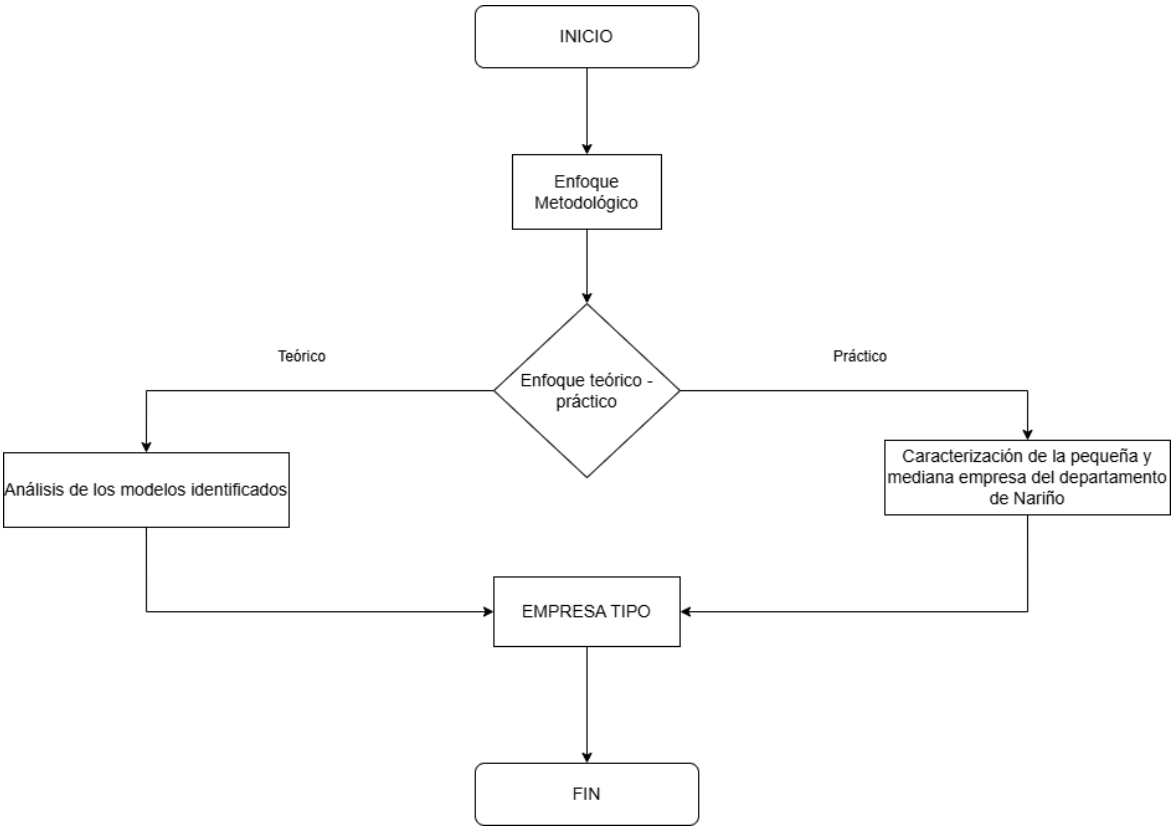
En primer lugar, se realizó una revisión exhaustiva de literatura sobre modelos de madurez y la adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0. Este análisis permitió identificar los marcos conceptuales, dimensiones clave y niveles de madurez propuestos por diversos

autores, los cuales se abordaron previamente en la sección 2.4. Estos elementos constituyen la base teórica para el diseño del modelo.

En segundo lugar, se llevó a cabo una caracterización de las PYMES en el departamento de Nariño. Este proceso incluyó el análisis de sus estructuras organizativas, sectores económicos y otros factores relevantes relacionadas con la adopción tecnológica. A partir de este diagnóstico, se definió una “empresa tipo” representativa del sector agroalimentario, que será descrita más adelante en el capítulo.

La integración de los hallazgos de la literatura y la caracterización de las PYMES en Nariño se realizó a través del concepto de una “empresa tipo”. Este concepto combinó las particularidades del sector agroalimentario local, como las barreras tecnológicas, las fortalezas organizativas y las características específicas de las empresas de la región. De este modo, la “empresa tipo” actúa como un puente entre la teoría y la práctica, permitiendo adaptar los elementos conceptuales a las condiciones reales del contexto local. Esto sirve como base para seleccionar las dimensiones clave y diseñar el modelo de madurez propuesto. La Figura 16. *Enfoque metodológico*, muestra la relación entre la revisión de literatura, la caracterización de las PYMES, la definición de la empresa tipo y la selección de dimensiones clave para la construcción del modelo.

Figura 16. *Enfoque metodológico*



Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

3.1.1 Caracterización de la pequeña y mediana empresa del departamento de Nariño

En este apartado, se realiza una exploración del entorno de las PYMES en el departamento de Nariño, con el objetivo de identificar las estructuras, sectores, infraestructuras, desafíos y oportunidades particulares que enfrentan este tipo de empresas. Los modelos de madurez se han centrado en algunos sectores específicos, y es crucial considerar el contexto local para desarrollar un modelo de madurez relevante y aplicable a las PYMES en Nariño, más específicamente en el municipio de Aldana.

En primer lugar, el departamento de Nariño se encuentra ubicado al suroccidente de Colombia más exactamente entre los 00°31’24’’ y 02°41’08’’ de latitud norte y los 75°51’19’’ y 79°01’34’’ de longitud oeste. Sus actividades económicas más relevantes son las relacionadas con la agricultura, la construcción y el comercio según Cámara de comercio de Pasto, (2022).

Colombia es un país con un alto porcentaje de pequeñas y medianas empresas, conocidas como PYMES. Estas organizaciones están definidas por las leyes colombianas: Ley 590 del 10 de Julio de 2000, Ley 905 del 2 de agosto de 2004 y Ley 2069 del 2020. Según estas leyes, una empresa se considera PYME si tiene menos de 200 empleados y activos totales de hasta 30.000 salarios mínimos legales vigentes (SMMLV). Estas empresas representan el 99.5% del tejido empresarial colombiano, según Murillo & Restrepo, (2016), constituyen alrededor del 65% del empleo total y contribuyen con aproximadamente el 35% del producto interno bruto (PIB).

Este fenómeno no se limita únicamente al ámbito nacional, ya que en el departamento de Nariño también existe una sólida presencia de pequeñas y medianas empresas. Estas organizaciones desempeñan un papel esencial en la economía local, generando empleo y contribuyendo al crecimiento del PIB de la región. (Franco Ángel & Urbano, 2019).

A través de fuentes secundarias, se realiza una caracterización de las PYMES del departamento de Nariño, y en particular, del sector agroalimentario. Todo esto se lleva a cabo mediante un enfoque cualitativo y descriptivo. Este enfoque metodológico se sustenta en la revisión de estudios previos que documentan las dinámicas organizativas y comerciales de la región (Argoti Chamorro, 2013; Toro Trejos & Montaño Agulo, 2013). Se utiliza un análisis documental para extraer información sobre las características estructurales y operativas de las empresas, con especial énfasis en la estructura de toma de decisiones y la implementación tecnológica en los procesos productivos. Además, no solo la revisión documental, sino también el análisis de las bases de datos de las Cámaras de Comercio de Pasto e Ipiales permite caracterizar las PYMES agroindustriales del departamento de Nariño.

El panorama empresarial en el departamento de Nariño es diverso y vital, con una presencia significativa de pequeñas y medianas empresas que desempeñan un papel fundamental en la economía local. Para describir adecuadamente las PYME en Nariño, es esencial considerar varios aspectos clave.

- ***Tamaño y Composición***

Según la Cámara de comercio de Pasto, (2022), en su estudio económico para el año 2022, en la jurisdicción norte del departamento de Nariño se encuentran registradas un total de 27.383 empresas, compuestas tanto por personas naturales como jurídicas. Estas empresas se distribuyen de la siguiente manera (Ver Anexo B):

- Microempresas → Representan el 95,8% del total de empresas.
- Pequeñas empresas → Representan el 3,2%
- Medianas empresas → Representan el 0,8%
- Grandes empresas → Representan el 0,18%

Por otra parte, la Cámara de Comercio de Ipiales (2023), en su estudio económico para el año 2023, se encuentran registradas 12.540 empresas, compuestas por personas naturales u organizaciones jurídicas, que se distribuyen de la siguiente manera (Ver Anexo C):

- Microempresas → Representan el 98,31% del total de empresas.
- Pequeñas empresas → Representan el 1,53%
- Medianas empresas → Representan el 0,16%

Es evidente que el porcentaje de Microempresas es muy alto. Sin embargo, no se han considerado dentro de esta investigación debido a que, para estos estudios económicos, las microempresas se componen principalmente de empresas unipersonales y organizaciones sin ánimo de lucro. Por lo tanto, no sería pertinente explorarlas en el contexto de esta tesis, que se centra en el estudio de un modelo de madurez como primer paso para la implementación de la Manufactura Digital en las PYME del municipio de Aldana, Nariño.

- ***Distribución Sectorial***

El tejido empresarial del departamento de Nariño es bastante diverso en cuanto a los sectores económicos que lo componen. La Tabla 15. *Distribución por sectores empresas Nariño, 2023*, muestra el número de empresas registradas en cada sector para el año 2023. Es importante destacar que estos datos son aproximados, basados en la información proporcionada por las bases de datos de las Cámaras de Comercio de Pasto e Ipiales, las cuales cubren el 84% del territorio nariñense bajo sus jurisdicciones. Esto permite obtener una visión general de la distribución actual de las empresas por sector.

A partir de esta información, se puede observar que el departamento de Nariño no está altamente industrializado. En cambio, su economía se orienta principalmente hacia el comercio y los servicios. El sector manufacturero ocupa el tercer lugar en cuanto al número

de empresas, lo que refleja una menor participación en comparación con los sectores comercial y de servicios.

Tabla 15. *Distribución por sectores empresas Nariño, 2023*

Sector de la economía	No. de empresas
A: Agricultura, ganadería, caza, selvicultura y pesca	458
B: Explotación de minas y canteras	33
C: Industria manufacturera	2.552
D: Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	10
E: Distribución de agua, evacuación y tratamiento de aguas	91
F: Construcción	649
G: Comercio al por mayor y menor, reparación de vehículos	18.942
H: Transporte y almacenamiento	1.250
I: Alojamiento y servicios de comida	4.331
J: Información y Comunicaciones	592
K: Actividades financieras y seguros	1.131
L: Actividades inmobiliarias	272
M: Actividades profesionales, científicas y técnicas	973
N: Actividades de servicios administrativos y apoyos	606
O: Administración pública y defensa; planes de seguridad	0
P: Educación	243
Q: Actividades de atención a la salud humana y asistencia social	515
R: Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación	735
S: Otras actividades de servicio	1259
T: Otras actividades	5

Fuente: Adaptado de “Estudio económico del municipio de Ipiales y área de jurisdicción” por Cámara de Comercio de Ipiales, 2023.

Ahora como la tesis central de este trabajo está en el diseño de un modelo de madurez para empresas manufactureras del sector agroalimentario en el municipio de Aldana, Nariño. Se analizará el sector de las PYMES agroalimentarias en Nariño. Debido a que este análisis se realiza a través de fuentes secundarias, se encontró que para el año 2013, las empresas PYMES agroalimentarias estaban ubicadas de la siguiente manera:

Tabla 16. *Empresas PYMES agroalimentarias de Nariño*

Región	Base de Datos	Participación (%)
Pasto	25	58
Tumaco	11	26
Ipiales	7	16
Totales	**43**	100

Fuente: Adaptado de Las PYMES agroindustriales de Nariño y su Aporte en el desarrollo de la región" por Argoti Chamorro, A., 2013, Revista de la Facultad de Ciencias, 10, 7 -34.

La Tabla 16. *Empresas PYMES agroalimentarias de Nariño*, fue construida gracias al análisis realizado por Argoti Chamorro en su trabajo de tesis de maestría denominado "Análisis de la Capacidad Competitiva de las PYMES del Subsector Agroindustrial como dinamizadoras del desarrollo del Departamento de Nariño" (Argoti Chamorro, 2013)

A través de entrevistas semi estructuradas, Argoti Chamorro construyó la Tabla 17. *Perfil de las PYMES agroalimentarias de Nariño* donde se muestra el perfil de las PYMES agroalimentarias del departamento de Nariño que se concentran principalmente en los tres municipios más grandes de cada región, Pasto (capital), Ipiales (zona sur) y Tumaco (zona pacífica). Los productos más representativos son los productos agroindustriales como los lácteos, café, cuero, aceites, grasas, etc. A través de estas entrevistas estas se descubrió que la conectividad a Internet es baja con relación a otros departamentos.

Tabla 17. *Perfil de las PYMES agroalimentarias de Nariño*

Factor Analizado	Caracterización
Ubicación geográfica	Concentración en Pasto, Ipiales y Tumaco.
Renglones	**Pasto:** Productos Lácteos, Café y sus derivados, Productos en Cuero y Transformación en Madera. **Tumaco:** Aceites y Grasas, Transformación en Madera, Fruticultura, Cacao y Pescado y sus derivados. **Ipiales:** Productos agrícolas, lácteos, Transformación de papa y sus derivados.
Conectividad	Baja.
Tradición empresarial	La mayoría creada en los últimos 18 años.
Tipo de sociedad	Unipersonales y familiares. Sociedad Anónima.
Inversión en Capital	$ 1.401 millones promedio. Pasto registra el mayor volumen de inversión.
Conformación de Capital	Privado.
Estructura Organizacional	Precaria.
Escolaridad de Directivos	Idóneos.
Orientación Científica o Disciplinar del Directivo	Inadecuada.
Capacidad Directiva	Insuficiente.
Tipos de Recursos para la Inversión	Adecuados.
Ingresos	Bajos (Menores a 50 SMLV Mensuales).
Calidad de Materia Prima	Alta (La mayoría).
Medios de Trabajo	Tradicionales.
Talento Humano	Absorción de Mano de Obra: 31 empleados promedio.
Nivel de Escolaridad	Precario.
Acciones I + D	Escasas.
Orientación al Mercado	Escaso.

Orientación al Comercio Internacional	Escaso.
Productos Exportados	Queso parmesano, Cacao, Langostinos y Palmito.
Destino de las Exportaciones	Venezuela, Suiza, Estados Unidos y Unión europea: Francia.

Fuente: Adaptado de "Las PYMES agroindustriales de Nariño y su Aporte en el desarrollo de la región" por Argoti Chamorro, A., 2013, Revista de la Facultad de Ciencias, 10, 7 -34.

Según Argoti Chamorro, 2013, las acciones de I+D son escasas, lo cual da un primer indicio de que la relación con la Manufactura Digital de estas empresas es baja. A través de la metodología de entrevistas, Argoti Chamorro, 2013 construyó la Tabla 18. *Empresas PYMES agroindustriales Nariño – medios de trabajo.*, mostrando el nivel tecnológico de las PYMES agroindustriales en el departamento de Nariño que evidencia que la mayoría de las organizaciones cuentan con medios de trabajo mecánicos, artesanales (Argoti Chamorro, 2013).

Tabla 18. *Empresas PYMES agroindustriales Nariño – medios de trabajo.*

Medios de Trabajo	Empresas		Nivel Tecnológico
	No.	Part %	
Automáticos	1	2	Moderno
Industriales y Automáticos	5	11	
Industriales	6	14	27
Mecánicos, industriales y automáticos	1	2	Nuevo
Mecánicos e industriales	2	5	7
Artesanales, mecánicos, industriales y automáticos	3	7	Mejorado
Artesanales, mecánicos y automáticos	1	2	
Artesanales, mecánicos e industriales	9	20	50
Artesanales e industriales	9	20	
Artesanales y mecánicos	5	11	Tradicional
Artesanales	2	5	16
TOTAL	**44**	**100**	**100**

Fuente: Tomado de "Análisis de la capacidad competitiva de las PYMES del subsector agroindustrial como dinamizadoras del desarrollo del departamento de Nariño" por Argoti Chamorro, A & Bucheli V., 2008, Universidad de Nariño.

Adicionalmente, la Tabla 18. *Empresas PYMES agroindustriales Nariño – medios de trabajo.*, muestra que las PYMES cuentan con un nivel tecnológico artesanal, mecánico e industrial, es decir, que no cuentan con gran adaptación de nuevas tecnologías y procesos innovadores; estas son unas de las razones porque las pequeñas y medianas empresas del departamento de Nariño no son competitivas como lo demuestra el informe de competitividad departamental (Argoti Chamorro & Bucheli E., 2008).

- ***Cultura Organizacional y gestión***

Muchos artículos e investigaciones han concluido que existe una relación entre la cultura organizacional y los indicadores de éxito de una empresa (Denison, 1990; Kotter & Heskett, 1992). Las empresas exitosas disponen de recursos para llevar a cabo acciones que antes no podían, como invertir en la formación de sus empleados, fortalecer la comunicación

interna y otras iniciativas. Sin embargo, aspectos como la cultura organizacional y los estilos de dirección no implican desembolsos adicionales para la empresa (Pérez Uribe, 2007; Schein, 2010). Una cultura organizacional sólida puede ser impulsada por el liderazgo y fomentada a través de prácticas que no necesariamente requieren grandes inversiones financieras (Deal & Kennedy, 1982).

En el departamento de Nariño, especialmente en la jurisdicción de la Cámara de Comercio de Ipiales, las PYMES suelen carecer de una estructura organizacional sólida. En muchos casos, sus organigramas no reflejan adecuadamente las relaciones jerárquicas y las líneas de autoridad, lo cual sugiere una falta de familiaridad con conceptos administrativos formales y un enfoque empírico en su organización interna (Cámara de Comercio de Ipiales, 2023).

La mayoría de las PYMES en la región tampoco están familiarizadas con el concepto de manufactura digital, lo cual impacta sus políticas y estrategias al no considerar la investigación y desarrollo (I+D) como una prioridad. Esto limita sus capacidades para innovar y adaptarse a la transformación digital, afectando directamente su estructura organizacional y la planificación estratégica (Argoti Chamorro, 2013; Dini et al., 2021).

- ***Diagnóstico de las PYMES en relación con la Manufactura Digital***

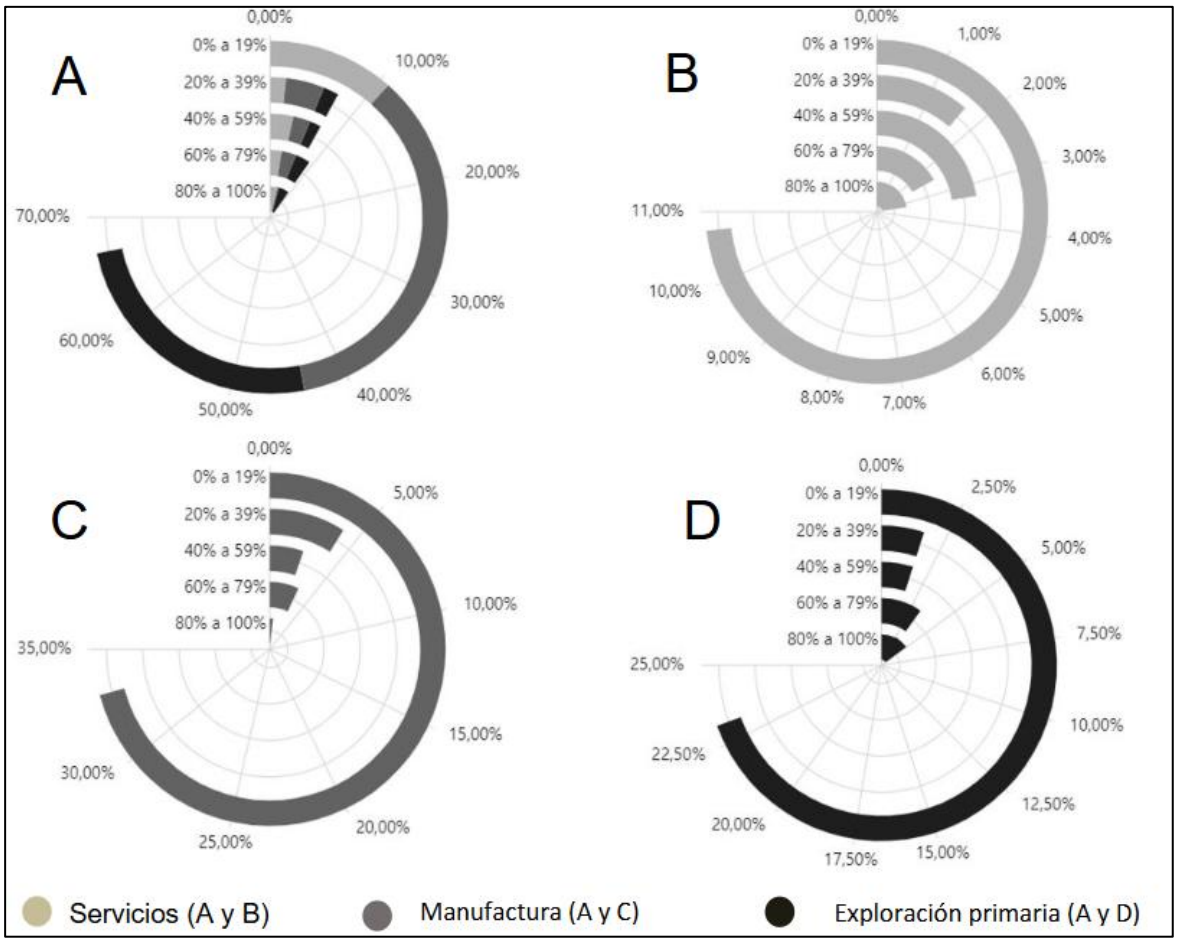
La Manufactura Digital abarca la integración de tecnologías avanzadas en los procesos de producción (Toapanta Guacapiña, 2018), como el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), la automatización, el análisis de datos, entre otros. Su implementación permite a las empresas mejorar la eficiencia, reducir costos y adaptarse rápidamente a las demandas del mercado. No obstante, en las PYMES, la adopción de estas tecnologías suele enfrentar desafíos específicos, como recursos financieros limitados y conocimientos técnicos especializados insuficientes (Dini et al., 2021).

De acuerdo con los informes de las Cámaras de Comercio de Pasto e Ipiales, la adopción de la Manufactura Digital en las PYMES en el departamento de Nariño es limitada, encontrándose en etapas iniciales (Argoti Chamorro, 2013). Pocas empresas han incorporado herramientas digitales avanzadas, y la mayoría depende de procesos manuales o sistemas que carecen de integración. Entre las herramientas digitales más utilizadas se encuentran sistemas básicos de planificación de recursos empresariales (ERP) y algunos sistemas de diseño asistido por computadora (CAD) (Cámara de Comercio de Ipiales, 2023; Cámara de Comercio de Pasto, 2024).

Según Muñoz-Pinzón et al., (2024), las PYMES de Colombia, presentan una baja implementación de herramientas de la industria 4.0. Para mejorar esta área, las empresas deberían incrementar su inversión en formación técnica y promover métodos de contratación más dinámicos y estratégicos que favorezcan el desarrollo tecnológico. El estudio realizado por Muñoz-Pinzón et al., (2024) también identificó las principales barreras de adopción de la Manufactura Digital en las PYMES locales. Entre estas barreras destaca la falta de conocimiento sobre las ventajas que ofrecen las tecnologías de generación de

datos, las cuales son fundamentales para realizar un seguimiento en tiempo real de los procesos, una característica esencial de la industria 4.0. La Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.*, muestra el porcentaje de equipos que se utilizan en diferentes sectores (Servicios, Manufactura y Exploración primaria) para la generación de datos, una etapa preliminar crucial en la implementación de la Manufactura Digital.

Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.*

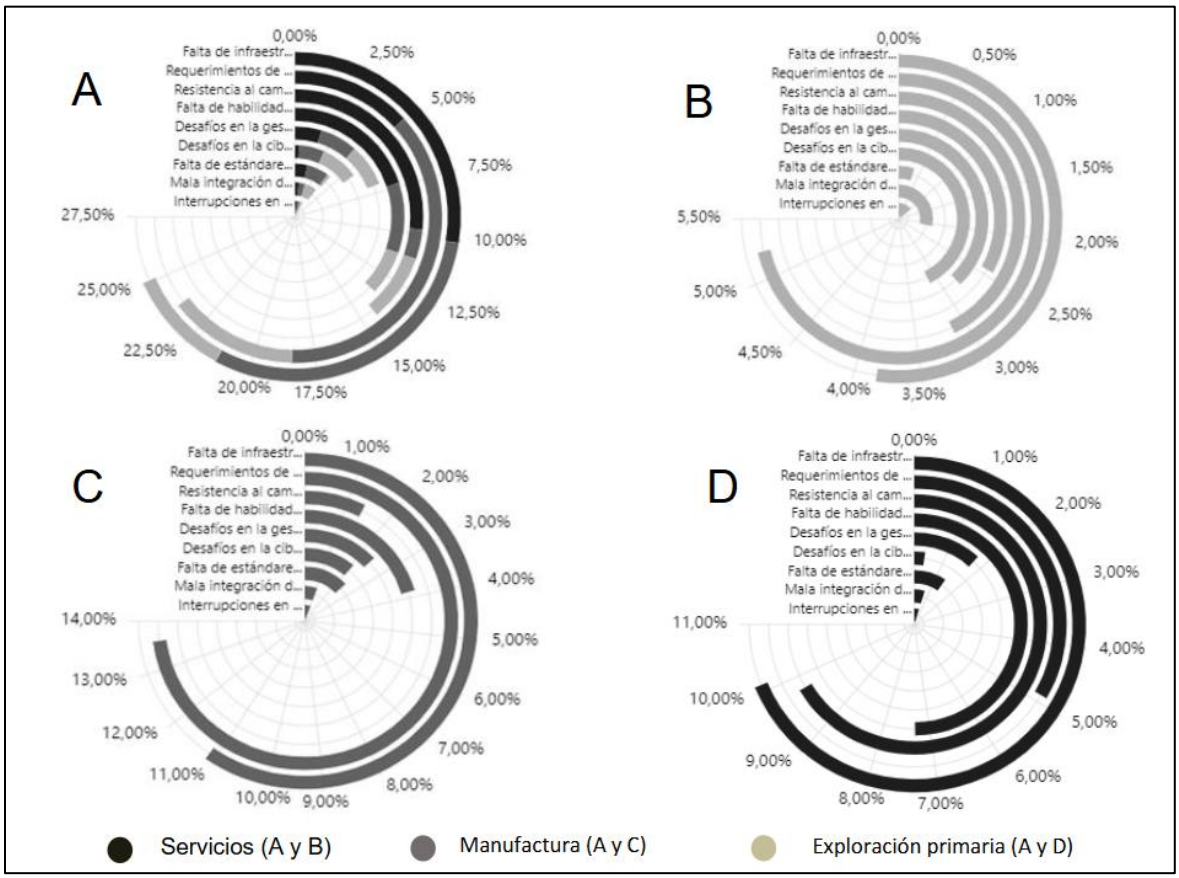


Fuente: Tomado "Estado actual de la adopción de la Industria 4.0 en pymes colombianas: desafíos y oportunidades" por Muñoz-Pinzón, et al, 2024, Revista Politécnica, 20(39), 99-118.

Se observa en la Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.*, diferencias significativas entre los sectores en cuanto a la adopción de tecnologías de generación de datos. En el sector manufacturero (Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.* letra C), esta adopción es especialmente baja, con solo el 0,83% de las empresas alcanzando un 80% y 100% de equipos que generan datos. En contraste, el sector de explotación primaria (Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.*, letra D) y el sector de servicios (Figura 17. *Porcentaje de equipos y maquinaria que generan datos.*, letra B) muestran porcentajes más altos con un 4,96% y

un 3,31% de sus empresas, respectivamente, que cuentan con un nivel similar de generación de datos en sus equipos. Esta situación sugiere que el sector manufacturero podría estar enfrentando desafíos específicos que limitan la integración de dichas tecnologías (Muñoz-Pinzón et al., 2024).

Figura 18. *Desafíos que enfrentan las PYMES en la adopción de I4.0*



Fuente: Tomado de "Estado actual de la adopción de la Industria 4.0 en pymes colombianas: desafíos y oportunidades" por Muñoz-Pinzón, et al, 2024, Revista Politécnica, 20(39), 99-118.

Por otra parte, la Figura 18. , muestra los desafíos que enfrentan cada uno de los sectores estudiados por Muñoz-Pinzón et al., (2024) se observa que la falta de infraestructura y los requerimientos de alta inversión son los desafíos más grandes que enfrentan las PYMES de todos los sectores (Figura 18. *Desafíos que enfrentan las PYMES en la adopción de I4.0*, letra A).

En el sector de servicios (Figura 18. *Desafíos que enfrentan las PYMES en la adopción de I4.0*, letra B), los desafíos son especialmente notables en el área como la ciberseguridad (3,1% del total general), la gestión y calidad de datos (2,8%) y los altos requerimientos de inversión (5,2%). En un sector que ya opera en un contexto mayormente digital, las

problemáticas de seguridad y manejo de datos son particularmente críticas. Para las PYMES manufactureras (Figura 18. *Desafíos que enfrentan las PYMES en la adopción de I4.0*, letra C), los obstáculos más significativos son los altos requerimientos de inversión (13,6%) y la carencia de infraestructura adecuada (11,2%). Estos factores reflejan la dificultad que enfrentan estas empresas para obtener los recursos financieros y físicos que permitan la implementación de tecnologías de la industria 4.0, siendo la inversión en infraestructura clave dado el carácter físico de las operaciones en manufactura. En el sector de explotación primaria (Figura 18. *Desafíos que enfrentan las PYMES en la adopción de I4.0*, letra D), la incorporación de tecnologías de la industria 4.0 en las PYMES se ve obstaculizada por la falta de infraestructura (10,1%) y la resistencia al cambio entre los empleados (9,8%). La carencia de habilidades en la fuerza laboral es otro reto significativo (7,3%). Esto indica la necesidad de un enfoque integral, que contemple tanto la inversión en infraestructura como la capacitación del personal y una adecuada gestión del cambio organizacional.

En síntesis, es evidente que las PYMES del departamento de Nariño enfrentan barreras significativas para la adopción de la Manufactura Digital. Los desafíos observados, como la falta de infraestructura, los elevados requerimientos de inversión, la carencia de habilidades de la fuerza laboral y la resistencia al cambio, limitan su capacidad para implementar sistemas avanzados de generación de datos y para gestionar sus operaciones de manera digitalizada y automatizada. Estos aspectos reflejan una necesidad imperiosa de fortalecer tanto la infraestructura física como los recursos humanos, con un énfasis particular en la formación técnica y la gestión del cambio organizacional. Además, la integración de una gestión de información estratégica en las PYMES, liderada por la alta gerencia, resultará crucial para la creación de una cultura organizacional que valore y promueva el uso de tecnologías digitales. Este enfoque integral no solo permitiría mejorar la eficiencia operativa, sino también facilitaría la transición de las PYMES hacia la industria 4.0, posicionándolas para competir en un mercado cada vez más impulsado por la tecnología.

3.1.2 Análisis de los modelos de madurez identificados

Como se ha mencionado anteriormente, este análisis es una continuación de lo presentado en la sección 2.4. En dicha sección, el análisis se centró en los marcos teóricos y metodologías utilizadas, además de extraer ciertos rasgos metodológicos que, desde el punto de vista del investigador de este trabajo, pueden ser interesantes para considerarse en el diseño del modelo.

Para establecer de manera objetiva cómo encajan algunas de las características de los modelos de madurez descritos en las secciones anteriores, se presenta un enfoque para abordar este análisis, partiendo de las condiciones del contexto de las PYMES agroalimentarias del departamento de Nariño. Adaptando la metodología utilizada por Díaz Jaimes & Ortiz Pimiento, (2012), se definieron ciertas características que permiten analizar

detalladamente los modelos y determinar qué aspectos pueden ser utilizados para el diseño del modelo de madurez.

- ***Criterios para analizar los modelos existentes***

Los criterios para analizar los modelos de madurez existentes se estructuraron haciendo preguntas basándose en seis criterios: características de las empresas, alcance del modelo, aspecto evaluado, cantidad de dimensiones, complejidad de uso y si los modelos son aplicables a PYMES agroalimentarias. Para lo cual, se definió:

Características de las empresas

Hace referencia a los aspectos operativos de las empresas a las que está dirigido el modelo. Es necesario responder la pregunta: ¿en qué tipo de empresas es aplicable el modelo de madurez? (Díaz Jaimes & Ortiz Pimiento, 2012).

Alcance del Modelo

El alcance del modelo puede clasificarse como general o específico. Se trata de un modelo de carácter general que está diseñado para ser aplicado a una amplia gama de empresas y sectores productivos. En cambio, se trata de un modelo de carácter específico, si está diseñado para ser aplicado a un sector económico particular.

Aspecto evaluado

Este criterio se enfoca en el aspecto central que el modelo evalúa. Puede tratarse de la madurez en términos de confiabilidad, flexibilidad o del desempeño organizacional en general. Para evaluarlo es necesario responder las siguientes preguntas:

- **Madurez tecnológica** → ¿El modelo de madurez evalúa la adopción de tecnologías de la industria 4.0? ¿cuáles tecnologías considera (IoT, Big Data, automatización, etc.)?
- **Confiabilidad** → ¿El modelo de madurez evalúa cómo las tecnologías mejoran la confiabilidad de los procesos y productos?
- **Flexibilidad** → ¿El modelo de madurez considera la capacidad de adaptación de las empresas a cambios en el mercado y personalización de productos?
- **Desempeño organizacional** → ¿Mide el impacto de la adopción tecnológica en el desempeño general de la organización (eficiencia, productividad, competitividad)?

Metodología de construcción

Para analizar la metodología de construcción del modelo de madurez, se busca responder al siguiente interrogante a través de la lectura de los artículos en los que se menciona los modelos de madurez evaluados: ¿Cómo fue diseñado el modelo de madurez? Es decir, si está basado en investigación académica, estudios de caso o prácticas industriales, y si

incluye la validación o pruebas empíricas del modelo. Además, se considera si la metodología permite adaptaciones según el sector y tamaño de la empresa.

Este criterio se desglosa en cuatro subcriterios clave. El primero es el **origen del modelo**, donde se explora si el modelo se fundamenta en investigación, estudios de caso, experiencias prácticas o entrevistas con expertos. El segundo subcriterio, se refiere a las **herramientas de construcción,** evaluando si el modelo emplea encuestas, análisis de datos, entrevistas u otras herramientas para medir la madurez de las empresas. El tercer subcriterio, analiza la **flexibilidad del modelo,** es decir, si es adaptable a diferentes sectores empresariales. Por último, el subcriterio de **validación** busca determinar si el modelo ha sido probado y validado en empresas reales o si su enfoque es puramente teórico.

Complejidad de Uso

Este criterio hace referencia a cuán difícil es poner en práctica el modelo de madurez dentro de un contexto real, es decir, preguntarse ¿Qué tan difícil es implementar el modelo de madurez en un entorno empresarial colombiano real? Criterio tomado de Páez et al., (2018).

- ***Análisis y comparación de los modelos considerados***

El análisis de las características de los modelos existentes identificados en las secciones anteriores se encuentra en la Tabla 19. *Comparación de modelos*, donde se muestra de manera resumida la comparación de cada uno de ellos y el ajuste al modelo que se pretende diseñar.

Para la construcción de la Tabla 19. *Comparación de modelos*, se adoptó una metodología basada en el análisis comparativo de los modelos de madurez disponibles en la literatura y su alineación con las características de las PYMES. El proceso comenzó con una revisión exhaustiva de las fuentes académicas y estudios relevantes que abordan diferentes modelos de madurez tecnológica y organizacional en diversos contextos industriales. Esta revisión permitió identificar modelos clave que respondieran a las necesidades particulares de las empresas en el contexto de la industria 4.0 y que fueran aplicables a las PYMES.

Posteriormente, se definieron criterios específicos para la comparación de los modelos, tales como las características de la empresa a la que están dirigidos, el alcance del modelo (general o específico), el aspecto evaluado, la complejidad de uso y la metodología de construcción. Estos criterios se seleccionaron en base con su relevancia para la aplicación práctica en el sector agroalimentario de Nariño y su pertinencia para el diseño de un modelo de madurez adaptado a las condiciones locales.

El proceso de análisis de cada modelo incluyó la evaluación de los enfoques metodológicos empleados, como revisiones de literatura, entrevistas a expertos, uso de herramientas de evaluación (como el “Digital Check”), o estudios empíricos. Se analizaron las fortalezas y debilidades de cada modelo, incluyendo si estos habían sido validados en sectores específicos o si eran flexibles para su adaptación a otros contextos.

Finalmente, se desarrolló la tabla comparativa donde se sintetizan las características clave de cada modelo. Esta tabla facilita la identificación de elementos comunes y diferencias importantes entre los modelos existentes, lo que permite establecer las bases para el diseño de un nuevo modelo de madurez que se ajuste a las particularidades de las PYMES en el sector agroalimentario de Nariño.

Este enfoque metodológico asegura que el modelo de madurez propuesto no solo en base en un análisis riguroso de la literatura, sino que también incorpore la flexibilidad y adaptabilidad necesarias para enfrentar los retos tecnológicos y organizacionales que caracterizan a las PYMES en entornos rurales y emergentes.

Tabla 19. *Comparación de modelos*

Modelo de Madurez	Características de la empresa	Alcance del Modelo	Aspecto Evaluado	Complejidad de uso	Metodología de Construcción
MM1	Pymes	General	Madurez tecnológica y Desempeño organizacional	Baja	Basado en investigación académica. Se utiliza una encuesta para recolección de datos; el modelo es adaptable a diferentes sectores. Incluye validación con empresas.
MM2	Pymes	General	Madurez tecnológica	Baja	Construido a partir de investigación académica. El modelo combina dimensiones y subdimensiones obtenidas mediante el análisis de la literatura. No incluye validación. Es adaptable teóricamente a diferentes sectores.
MM3	Todo tipo de empresas	General	Flexibilidad	Baja	Metodología colaborativa con la industria mediante un programa piloto que evalúa las habilidades y tecnologías dominadas por la empresa.
MM4	Empresas Tailandesas	Específico	Madurez tecnológica	Alta	El modelo fue construido a través de la revisión de literatura. Es un modelo personalizado a la situación particular de Tailandia. El modelo no ha sido validado.
MM5	Todo tipo de empresas	General	Madurez tecnológica	Media	La metodología se construyó con 9 dimensiones a través del análisis de entrevistas a diferentes empresas basados en el algoritmo de Rasch. Estudio empírico no validado.
MM6	Todo tipo de empresas	General	Madurez tecnológica	Baja	El modelo fue construido a partir de la experiencia de la compañía al diseñar otros modelos de madurez a través de los años. El modelo ha sido validado únicamente en empresas del sector tecnológico.
MM7	Pymes	Específico	Desempeño organizacional, confiabilidad, flexibilidad	Baja	El modelo fue construido a partir de una revisión de literatura, así como de entrevistas a expertos. No ha sido validado el modelo. El modelo es bastante flexible y se adapta a diferentes sectores industriales.
MM8	Pymes	Específico	Madurez tecnológica	Baja	El modelo se basa en una herramienta llamada “Digital Check” que consiste en una

					entrevista. Validado en el sector manufacturero.
MM9	Pymes	General	Madurez tecnológica	Media	El modelo está basado en la revisión de literatura, de ahí desarrolla el modelo, validación del modelo. Considera el contexto colombiano en su diseño.
MM10	Empresas portuguesas	General	Madurez tecnológica	Alta	El modelo se desarrolló mediante una mezcla de métodos, en primer lugar, se realizó un estudio cualitativo, en 4 pasos, donde se realizó una revisión de literatura, se entrevistó expertos, se realizaron entrevistas y finalmente se definió el modelo como tal.
MM11	Pymes	General	Madurez tecnológica, flexibilidad, confiabilidad, desempeño organizacional	Media	El modelo se diseñó inicialmente mediante una revisión bibliográfica, de esta manera y según la literatura se definió dimensiones, y por último se hizo la validación del modelo como tal.
MM12	Pymes	General	Madurez tecnológica, desempeño organizacional	Baja	La metodología de diseño es transformar un modelo existente en un enfoque más general desde su diagnóstico inicial hasta un plan de acción inmediato. Es un modelo flexible. El modelo fue validado en empresas del sector energético.
MM13	Pymes	General	Madurez tecnológica, flexibilidad, confiabilidad, desempeño organizacional	Alta	El modelo se desarrolló mediante una revisión de literatura y entrevistas para definir dimensiones y niveles y a través de las herramientas del proyecto RAISE 4.0 desarrollado para fomentar el uso de nuevas tecnologías en compañías.
MM14	Pymes	Específico	Madurez tecnológica	Media	Se desarrolló el modelo utilizando un enfoque de múltiples casos de estudio comenzando con una revisión de literatura. El modelo fue validado a través de dos casos de estudios con planes piloto.
MM15	Pymes	Específico	Madurez tecnológica, flexibilidad, confiabilidad	Alta	El modelo se desarrolló a través de una revisión de literatura, que se concentró en encontrar los vacíos entre los modelos existentes en la literatura. Se elaboró un marco teórico para la aplicación de estos modelos. No es flexible ya que se considera para ciertos tipos de sectores industriales.
MM16	Empresas del sector agroindustrial	Específico	Madurez tecnológica	Alta	Para desarrollar el modelo, se revisó la literatura, y se creó una lista de requerimientos sostenibles para el sector de los trabajadores. Los criterios para la evaluación del modelo de madurez fueron creados mediante el criterio Best-Worst Method (BWM)

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la Tabla 19. *Comparación de modelos*, se llevó a cabo mediante la identificación de patrones comunes y diferencias significativas entre los modelos de

madurez considerados. El primer paso consistió en examinar las similitudes en cuanto a su aplicabilidad a PYMES, tanto en contextos generales como específicos, lo cual permitió evaluar la versatilidad de los modelos y su potencial de adaptación a diversos sectores productivos. Por ejemplo de los 16 modelos analizados, el 37,5% fueron diseñados para contextos específicos (MM4, MM7, MM8, MM14, MM15 Y MM16), lo que indica que, aunque algunos están orientados a entornos particulares, la mayoría posee un enfoque general o adaptable.

Modelos como el MM1, MM3 y MM5 presentan un enfoque general, lo cual confiere una mayor versatilidad para ser aplicados en distintos sectores. A su vez, modelos como el MM12 y el MM13, si bien fueron desarrollados con una orientación sectorial específica, muestran estructuras metodológicas flexibles basadas en entrevistas, validaciones empíricas y herramientas adaptativas, lo que sugiere un alto potencial de adaptación a otros contextos. Esta diversidad en el alcance y en las metodologías de construcción sugiere que es posible diseñar un modelo que, sin perder rigurosidad conceptual, pueda ajustarse a distintas realidades sectoriales, incluyendo las PYMES del sector agroalimentario del departamento de Nariño.

En una segunda etapa, se evaluaron los aspectos abordados por cada modelo. Para ello, se revisó la columna correspondiente en la Tabla 19. *Comparación de modelos*, identificando los temas centrales evaluados por cada propuesta. Estos aspectos fueron posteriormente agrupados en tres categorías clave: madurez tecnológica, desempeño organizacional y flexibilidad/confiabilidad. Esta clasificación permitió observar tendencias comunes en los modelos analizados. Por ejemplo, el 75% de los modelos, se enfoca en la madurez tecnológica, lo que evidencia una fuerte orientación hacia la evaluación de capacidades digitales y tecnológicas en las organizaciones (MM1, MM2, MM4, MM5, MM6, MM8, MM9, MM10, MM12, MM13, MM14, MM16). Además, varios modelos incorporan dimensiones adicionales como el desempeño organizacional (MM1, MM11, MM12, MM13), y la flexibilidad/confiabilidad (MM7, MM11, MM13, MM15), aspectos que complementen el diagnóstico de madurez al incluir variables operativas y estratégicas relevantes para entornos cambiantes.

Finalmente, se compararon los aspectos evaluados por los modelos de madurez con las necesidades específicas del sector agroalimentario de Nariño. Esta comparación reveló que los modelos abordan con mayor frecuencia la madurez tecnológica (MM1, MM2, MM5, MM6, MM9, MM13), el desempeño organizacional (MM1, MM11, MM12) y la flexibilidad o confiabilidad (MM7, MM11, MM13). Estos hallazgos fueron contrastados con los desafíos identificados en el diagnóstico del sector, donde se evidenció que las PYMES agroalimentarias presentan limitaciones en infraestructura tecnológica, debilidades en la gestión organizacional y dificultades para adaptarse a entornos rurales y cambiantes.

Se concluye por lo tanto, que las dimensiones mencionadas resultan altamente pertinentes y deben considerarse como ejes centrales en el diseño del modelo de madurez, ya que

responden de manera directa y concreta a las condiciones y necesidades identificadas en el contexto local.

3.1.3 Empresa Tipo

En el marco del diseño del modelo de madurez, se definió el concepto de “empresa tipo” como un puente metodológico que permite integrar los hallazgos de la revisión de literatura sobre los modelos de madurez (ver sección 3.1.2) con las particularidades del contexto local de las PYMES del sector agroalimentario en el departamento de Nariño (ver sección 3.1.1). Este enfoque metodológico permite facilita la traducción de los conceptos teóricos en elementos operativos concretos, ajustados a las condiciones reales de las PYMES del sector agroalimentario. De esta manera, se garantiza una base sólida para el diseño de un modelo de madurez pertinente, contextualizado y factible de implementar.

La empresa tipo se define, para efectos de este trabajo, como una pequeña empresa del sector agroalimentario ubicada en el departamento de Nariño, que presenta características organizativas y tecnológicas específicas derivadas del análisis contextual realizado (ver sección 3.1.1). Estas características reflejan una estructura operativa representativa del entorno local, y se describen a continuación:

- **Estructura Organizativa:** Organización jerárquica centralizada, en la que las decisiones clave recaen en una o pocas personas, generalmente el propietario o gerente general. Este esquema responde a la simplicidad operativa típica de las pequeñas empresas familiares o de gestión individual.
- **Procesos Operativas:** Predominantemente informales, con escaso nivel de estandarización y mínima documentación de procedimientos. Esta situación limita la implementación de procesos tecnológicos avanzados y dificulta la sistematización de mejoras.
- **Actividad económica:** Centrada en la producción, transformación y comercialización de productos agroalimentarios característicos de la región como café, lácteos, tubérculos y frutas orientados principalmente a mercados locales o regionales, con baja inserción en cadenas de valor globales.
- **Nivel de digitalización:** Uso de herramientas tecnológicas básicas, como software de contabilidad o programas de gestión elemental. Se observa una incorporación limitada de tecnologías asociadas a la Manufactura Digital y a los principios de la Industria 4.0
- **Desafíos Tecnológicos:** Las principales barreras identificadas incluyen la falta de formación técnica del personal, escasos recursos financieros para inversión en tecnología, y una limitada conciencia sobres los beneficios estratégicos de la transformación digital.

La integración de los hallazgos obtenidos en la revisión de literatura y el diagnóstico del contexto local permitió establecer correspondencias entre las características observadas en las PYMES agroalimentarias de Nariño y las dimensiones comúnmente abordadas en los modelos de madurez. Por ejemplo, aspectos como la informalidad en los procesos operativos y el bajo nivel de digitalización se alinean con los niveles iniciales de madurez

descritos en la literatura especializada. No obstante, el análisis contextual también permitió identificar fortalezas particulares del territorio, tales como el conocimiento tradicional asociado a los procesos agroalimentarios y la estrecha vinculación con mercados regionales, elementos que suelen estar ausentes o poco desarrollados en los modelos genéricos.

En este sentido, el concepto de empresa tipo no solo facilita la contextualización de las dimensiones del modelo de madurez, sino que también contribuye a garantizar su pertinencia, aplicabilidad y relevancia práctica en el entorno específico de las PYMES agroalimentarias de Nariño. En las secciones siguientes se detalla cómo esta caracterización orienta la definición de las dimensiones clave y los niveles progresivos del modelo propuesto.

3.2 Definición de dimensiones

Un modelo de madurez es una herramienta clave para evaluar organizaciones y guiarlas en el proceso de alcanzar mayores niveles de estructuración, eficiencia y transformación. Su propósito es delinear las etapas necesarias para lograr un estado de madurez organizacional y tecnológica, detallando las características de cada frase y explicando cómo se conectan de manera secuencial. En el contexto de la Industria 4.0, los modelos de madurez desempeñan un papel crucial al ofrecer a las organizaciones una hoja de ruta para adaptarse a los desafíos y oportunidades de la transformación digital (Blatz et al., 2018).

Como se ha mencionado en apartados anteriores, los niveles de un modelo de madurez representan los estados de progreso que una organización pueda alcanzar, desde un nivel inicial hasta uno avanzado o líder, reflejando su grado de preparación para implementar tecnologías propias de la industria 4.0 (Blatz et al., 2018, Pan Nogueras et al., 2022).

En este marco, las dimensiones se entienden como las áreas estratégicas que el modelo evalúa dentro de la organización, tales como tecnología, procesos, personas estrategia, entre otras. Estas dimensiones permiten estructurar la evaluación, identificar fortalezas y debilidades y establecer metas de desarrollo específicas para cada componente organizacional.

3.2.1 Revisión de las dimensiones en modelos previos.

Para asegurar la validez y pertinencia del modelo de madurez propuesto, se realizó una revisión sistemática de modelos existentes en la literatura científica. El objetivo fue identificar las dimensiones más utilizadas y evaluar su aplicabilidad al contexto de las PYMES manufactureras del sector agroalimentario en el municipio de Aldana, Nariño.

- ***Metodología de revisión de modelos previos***

El proceso de revisión y selección de dimensiones se llevó a cabo en cuatro etapas:

1. *Extracción y clasificación de dimensiones*

Se identificaron las dimensiones propuestas en cada uno de los modelos analizados y se agruparon según similitudes conceptuales. Se establecieron categorías generales como tecnología, procesos, organización, estrategia, personas, etc.

2. *Análisis de recurrencia*

Se determinó la frecuencia con la que cada dimensión aparecía en los modelos analizados.

Se utilizó una tabla de doble entrada para visualizar la presencia de cada dimensión en los modelos seleccionados.

3. *Selección preliminar de dimensiones*

Se priorizaron aquellas dimensiones que aparecían en al menos tres modelos distintos.

Se analizaron dimensiones menos frecuentes, evaluando su relevancia para el contexto de las PYMES en Nariño.

- ***Resultados del análisis de modelos previos***

Como resultado del análisis de los 16 modelos de madurez considerados (ver Tabla 19. *Comparación de modelos*), se identificaron siete categorías principales de dimensiones, las cuales fueron sistematizadas en la Tabla 20. *Frecuencia de dimensiones en modelos previos*. Las más recurrentes en los modelos analizados fueron: Estrategia y liderazgo (9 apariciones), Tecnología (7), Procesos y operaciones (6) y Personas (6). Estas dimensiones representan áreas ampliamente reconocidas como fundamentales para la transformación digital en el contexto de la Industria 4.0.

Otras dimensiones como Inversión y financiamiento (4), Gestión de datos y ciberseguridad (4), Innovación y adaptabilidad (2) también aparecen en varios modelos, aunque con menor frecuencia.

Tabla 20. *Frecuencia de dimensiones en modelos previos*

Modelos de Madurez	Estrategia y Liderazgo	Tecnología	Procesos y operaciones	Personas o empleados	Inversión y financiamiento	Gestión de datos y ciberseguridad	Innovación y adaptabilidad
MM1	X	X	X				
MM2		X	X	X			
MM3	X			X			
MM4		X	X				
MM5	X				X		
MM6	X	X				X	
MM7		X	X	X			

MM8	X				X		
MM9			X			X	
MM10	X	X					X
MM11				X	X		
MM12	X	4				X	
MM13				X		X	
MM14				X			
MM15	X				X		
MM16	X	X	X				X
TOTAL	**9**	**7**	**6**	**6**	**4**	**4**	**2**

Fuente: Elaboración propia.

- ***Interpretación resultados***

Del análisis de recurrencia, se identificaron las siguientes dimensiones como las más representativas en los modelos de madurez analizados.

La dimensión **Estrategia y liderazgo,** trata acerca de lo relacionado con la visión general de la alta gerencia de las empresas PYMES con lo relacionado a la industria 4.0, además de su conciencia de ser indispensable adaptar nuevas tecnologías al sistema productivo de la empresa, esto incluye que la alta gerencia conozca las implicaciones en términos económicos, productivos y organizacionales que implica dar este salto (Beltz et al., 2018; Brozzi et al., 2021; Castelo-Branco et al., 2022; Pan Nogueras et al., 2022; Rahamadulla et al., 2021).

Además, una adecuada preparación estratégica facilita una implementación más eficiente de las tecnologías emergentes, ya que los líderes pueden alinear los objetivos de la adaptación de la industria 4.0 con los objetivos generales de la organización. Las empresas con una visión clara de la Manufactura Digital tienden a optimizar sus recursos, mejorar su competitividad y adaptarse más rápidamente a los cambios del mercado.

La dimensión **tecnología,** representa un componente técnico crucial, ya que evalúa la infraestructura necesaria para la adaptación de tecnologías de la industria 4.0 como Big Data, Internet de las Cosas (IoT), entre otras. Esta dimensión presente en muchos de los modelos de madurez analizados mide la preparación y adecuación de la infraestructura para facilitar la adopción tecnológica. La transformación digital depende directamente de la transformación tecnológica, lo que implica la necesidad de soluciones basadas en la nube y la implementación de tecnologías que permitan el seguimiento y la trazabilidad de los procesos industriales que las organizaciones llevan a cabo (Amaral & Pecas, 2021; Methaviakul & Santiteerakul Salinee, 2018; Mittal, Romero, et al., 2018; Castelo-Branco et al., 2022).

A medida que las empresas avanzan en su nivel de madurez tecnológica, es fundamental identificar las brechas entre su infraestructura actual y los requisitos tecnológicos necesarios para implementar soluciones avanzadas. Esto varía según el tamaño y el sector

de la empresa. Por ejemplo, en las PYMES del sector agroalimentario, la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 puede ser más lenta debido a restricciones presupuestarias o la falta de personal capacitado. Evaluar el estado de la infraestructura y su capacidad para integrar nuevas tecnologías permite a las empresas planificar estrategias de inversión y capacitación para superar estos desafíos y avanzar en su transformación digital.

La dimensión **procesos y operaciones,** evalúa la eficiencia y automatización de las actividades y tareas dentro de la empresa. Se enfoca en identificar el tipo de procesos, si son manuales, semi-automatizados o completamente automatizados, y el nivel de integración de tecnologías para la recogida de datos durante la ejecución de estos procesos. La capacidad de monitorizar en tiempo real mediante sensores y sistemas de control es crucial para optimizar el rendimiento y la productividad. Además, esta dimensión considera la gestión de datos, incluyendo cómo se almacenan y utilizan los datos de los clientes, lo que permite mejorar la toma de decisiones y personalizar la oferta de productos y servicios (Beltz et al., 2018; Amaral & Pecas, 2021; Methaviakul & Santiteerakul Salinee, 2018).

El objetivo final de esta dimensión es garantizar que los procesos operativos estén alineados con los principios de la industria 4.0, lo que implica no solo la automatización, sino también la integración y optimización de los flujos de trabajo. Esto incluye la capacidad de adaptar los procesos de cambios en la demanda, mejorar la eficiencia energética y reducir el desperdicio. Además, se busca que la empresa pueda implementar tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y el análisis predictivo para mejorar la toma de decisiones en tiempo real, permitiendo una mayor flexibilidad y respuesta rápida a las necesidades del mercado y el cliente.

La dimensión **personas o empleados,** evalúa la actitud y preparación de los empleados frente a la adopción de tecnologías digitales en el contexto de la industria 4.0. Es esencial capacitar a la fuerza laboral para que el proceso de transformación digital sea fluido y no genere resistencia o dificultades. La adopción de nuevas tecnologías implica la reorientación de roles y responsabilidades dentro de la organización, permitiendo que los empleados asuman nuevas tareas alineadas con los avances tecnológicos. Además, esta dimensión considera la creciente relevancia del trabajo remoto y el uso de plataformas colaborativas para la gestión administrativa documental. La colaboración interdisciplinaria se convierte en un factor clave para avanzar un nivel óptimo de madurez, asegurando que la empresa esté bien preparada para enfrentar los desafíos de la transformación digital.

Las dimensiones con mayor presencia en la literatura sirvieron como base para la construcción del modelo de madurez propuesto. No obstante, en la siguiente sección, se realiza un análisis complementario considerando el contexto de las PYME en el departamento de Nariño, con el objetivo de adaptar las dimensiones a las necesidades y desafíos específicos de la región.

3.2.2 Integración del contexto local y definición final de dimensiones

La definición final de las dimensiones del modelo de madurez no se basó únicamente en la frecuencia de aparición en los modelos analizados, sino que también incorporó criterios de pertinencia contextual. Esta doble perspectiva literatura científica – realidad local, fue clave para garantizar la relevancia, utilidad y aplicabilidad del modelo propuesto en el entorno específico de las PYMES agroalimentarias del municipio de Aldana, Nariño.

Para ello, se utilizó como insumo fundamental la caracterización de la empresa tipo (ver sección 3.1.3), construida a partir de los hallazgos del diagnóstico territorial y del análisis de las condiciones operativas, tecnológicas y organizativas de las empresas del sector. Esta figura metodológica permitió establecer un puente entre los marcos teóricos de madurez organizacional y la realidad operativa de las empresas locales, asegurando que las dimensiones seleccionadas reflejen tanto las aspiraciones de transformación digital como las condiciones iniciales de partida.

El análisis de la empresa tipo reveló patrones consistentes: estructuras jerárquicas centralizadas, escasa digitalización, procesos informales, limitaciones en capacitación técnica y restricciones financieras. Estos rasgos fueron directamente relacionados con las categorías de evaluación comúnmente utilizadas en modelos previos, como infraestructura tecnológica, procesos, personas y liderazgo. Sin embargo, el enfoque contextual permitió también identificar necesidades y fortalezas no siempre consideradas en los modelos genéricos, tales como la necesidad de adaptabilidad operativa frente a condiciones cambiantes, el papel del conocimiento tradicional y el potencial de innovación endógena en entornos rurales.

En este sentido, la selección final de las dimensiones responde a tres principios metodológicos fundamentales:

- **Recurrencia teórica:** Se priorizaron dimensiones presentes en al menos tres modelos de madurez reconocidos en literatura, como tecnología, procesos y personas, y estrategia/liderazgo
- **Pertinencia contextual:** Se consideraron aquellas dimensiones que, aunque menos frecuentes en los modelos analizados, fueron identificadas como críticas en el contexto agroalimentario de Nariño, como la adaptabilidad comercial o la confiabilidad operativa.
- **Validación de aplicación:** Las dimensiones seleccionadas fueron evaluadas en función de su posibilidad de medición, implementación y comprensión por parte de las empresas objetivo, evitando formulaciones excesivamente técnicas o alejadas de la realidad empresarial.

El resultado de este proceso de integración es un conjunto de siete dimensiones que permiten una evaluación integral, realista y progresiva del nivel de madurez digital de las PYMES agroalimentarias. Estas dimensiones no solo representan áreas clave para la

transición hacia la Industria 4.0, sino que también sirven como ejes estructurales del modelo propuesto, alrededor de los cuales se organizarán los niveles de madurez y los indicadores de evaluación.

3.2.3 Dimensiones del Modelo de Madurez

Basándose en la revisión bibliográfica (Sección 3.2.1) y en la integración del contexto local (Sección 3.2.2), se han identificado y seleccionado dimensiones clave para el diseño del modelo de madurez. Este proceso se llevó a cabo con el objetivo de garantizar claridad conceptual, evitar redundancias entre dimensiones con alto grado de solapamiento y priorizar la pertinencia en relación con las necesidades del contexto regional.

- ***Metodología para la consolidación de dimensiones***

Para determinar las dimensiones finales del modelo, se siguió un proceso estructurado en cuatro fases:

Tabla 21. *Fases de consolidación de dimensiones*

Fases	Descripción
1- Comparación Inicial	Se contrastaron las dimensiones más recurrentes en los modelos analizados (ver Tabla 20) con aquellas derivadas del diagnóstico territorial y de la caracterización de la empresa tipo.
2- Análisis de redundancia	Se evalúo el grado de solapamiento conceptual entre dimensiones similares, priorizando claridad terminológica y especificidad.
3- Priorización contextual	Se valoraron las dimensiones en función de su alineación con los principales desafíos identificados en las PYMES de Nariño, especialmente en cuanto a transformación digital.
4- Selección y ajustes finales	Se consolidaron dimensiones conceptualmente equivalentes y se ajustó la nomenclatura para mayor comprensión y aplicabilidad por parte de los actores locales.

Fuente: Elaboración propia.

- ***Fusiones y ajustes en las dimensiones***

Con base en el análisis anterior, se realizaron las siguientes fusiones y ajustes, que permiten reducir la complejidad del modelo y mejorar su aplicabilidad práctica:

Estrategia y liderazgo vs Gestión del cambio organizacional.

Motivo de fusión: Ambas dimensiones evalúan la capacidad estratégica de la empresa para adoptar, tecnologías digitales y gestionar la transformación organizacional.

Justificación: En el contexto de las PYMES manufactureras de Nariño, la gestión del cambio organizacional está estrechamente vinculada con la planificación estratégica y el liderazgo de la alta dirección. La resistencia al cambio y la

transformación digital dependen, en gran medida, de la visión y compromiso de los lideres empresariales.

Ambas dimensiones abordan cómo las empresas formulan estrategias para enfrentar los retos asociados con la implementación de tecnologías avanzadas. Dado que ambas se centran en la capacidad estratégica y la gestión del cambio, se ha decidido integrar estos elementos en una sola dimensión denominada **Estrategia y liderazgo,** que refleja mejor el papel de la dirección en la transformación organizacional.

Dimensión Final: Estrategia y liderazgo.

Tecnología vs Infraestructura tecnológica

Motivo de fusión: Ambas dimensiones evalúan la capacidad técnica de la empresa para implementar soluciones digitales.

Justificación: En el contexto local, la principal barrera identificada es la falta de la infraestructura tecnológica adecuada (equipos, conectividad, almacenamiento de datos). Por ello, el término Infraestructura tecnológica refleja con mayor precisión los desafíos específicos de las PYMES en la adopción de la Industria 4.0.

Ambas dimensiones evalúan la capacidad de las organizacionales para contar con una infraestructura adecuada para implementar la Manufactura Digital. Se selecciona **Infraestructura tecnológica** como dimensión del modelo debido a su mayor claridad y conexión directa con los requerimientos tecnológicos del entorno industrial.

Dimensión final: Infraestructura tecnológica

Procesos y operaciones vs Nivel de digitalización de procesos

Motivo de fusión: Ambas dimensiones evalúan el grado de automatización y digitalización de los procesos internos de la empresa.

Justificación: En el contexto regional, el desafío principal no es solo la optimización de procesos, sino su grado de integración con herramientas tecnológicas. La expresión Nivel de digitalización de procesos más específica y permite evaluar de manera clara la evolución de la madurez digital en las empresas.

Dimensión final: Nivel de digitalización de procesos.

Personas o empleados vs Capacidades de la fuerza laboral

Motivo de fusión: Ambas dimensiones analizan la preparación del personal para adaptarse a la Industria 4.0.

Justificación: Si bien el término Capacidades de la fuerza laboral enfatiza la formación técnica, personas o empleados es más inclusivo y considera factores como la cultural organizacional, el trabajo interdisciplinario y la adaptación a nuevas tecnologías.

Dimensión final: Personas o empleados.

- ***Dimensiones finales del modelo de madurez***

Luego del proceso de consolidación, el modelo quedó estructurado en las siguientes siete dimensiones clave:

Tabla 22. *Definición de dimensiones*

No.	Dimensión final	Definición operativa
1	Estrategia y Liderazgo	Evalúa la capacidad de la alta dirección para impulsar la transformación digital y gestionar el cambio organizacional.
2	Infraestructura tecnológica	Analiza la disponibilidad, modernización e integración de tecnologías clave para la Industria 4.0.
3	Nivel de digitalización de procesos	Mide el grado de digitalización, automatización e integración de tecnología en los procesos operativos clave.
4	Personas o empleados	Examina la preparación del talento humano en términos de formación técnica, habilidades digitales, cultura de innovación y capacidad e adaptación.
5	Inversión y financiamiento	Evalúa la capacidad de la organización para asignar recursos financieros sostenibles a iniciativas de transformación digital.
6	Gestión de datos y ciberseguridad	Mide la capacidad de la empresa para manejar, analizar y proteger datos en entornos digitales.
7	Innovación y adaptabilidad	Evalúa la disposición de la empresa para adaptarse a cambios tecnológicos y generar valor mediante la innovación en productos, procesos y mercados.

Fuente: Elaboración propia.

- ***Relación entre dimensiones seleccionadas y barreras del contexto***

A continuación, se presenta la relación directa entre las dimensiones seleccionadas y las principales barreras identificadas en el diagnóstico del contexto:

Tabla 23. *Relación entre las dimensiones seleccionadas y barreras identificadas en el contexto.*

Dimensión final del modelo	Barreras clave identificadas en el contexto
Estrategia y liderazgo	Falta de planificación estratégica en digitalización.
Infraestructura tecnológica	Carencia de equipos y conectividad.

Nivel de digitalización de procesos	Baja adopción de herramientas digitales.
Personas o empleados	Falta de formación y resistencia al cambio.
Inversión y financiamiento	Dificultades para acceder a financiamiento tecnológico.
Gestión de datos y ciberseguridad	Falta de implementación de análisis de datos y ciberseguridad.
Innovación y adaptabilidad	Poca vinculación con redes de innovación y baja tasa de implementación de tecnologías.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Niveles de Madurez

Los niveles de madurez representan una escala progresiva que describe el grado de desarrollo que una organización puede alcanzar en cada dimensión del modelo. Estos niveles permiten identificar el estado actual de una empresa, establecer metas de mejora y trazar una hoja de ruta hacia una mayor integración tecnológica, organizativa y estratégica en el marco de la industria 4.0 (Sonntag et al., 2024).

La construcción de los niveles de madurez se fundamentó en la metodología que se viene desarrollando durante el capítulo, la revisión de literatura especializada, la caracterización de la empresa tipo y la lógica de progresión por etapas, que responde al principio de mejora continua y desarrollo incremental en el uso de tecnologías digitales y en la transformación organizacional.

El modelo propuesto adopta una estructura de cuatro niveles de madurez, definidos de la siguiente manera:

Tabla 24. *Niveles de madurez*

Nivel	Nombre	Descripción General
1	Inicial	La empresa presenta condiciones mínimas o inexistentes en la dimensión evaluada. Sus procesos son informales, reactivos o no sistematizados. No hay uso estratégico de tecnologías digitales.
2	Básico	Se han implementado prácticas o herramientas elementales. Existe una intención inicial de mejora, aunque limitada en alcance y profundidad.
3	Intermedio	La empresa cuenta con procesos parcialmente digitalizados o formalizados, con una estructura de gestión incipiente, tecnologías adoptadas de formas más sistemática, y una cultura organizacional en transición.
4	Avanzado	La dimensión está integrada de forma estratégica. Se utilizan tecnologías y prácticas de manera eficiente, sostenida y alineada con los objetivos organizacionales. Hay adaptación continua al cambio.

Fuente: Elaboración propia.

Se optó por una estructura de cuatro niveles por que permite una progresión clara, sin ambigüedad de estados, además es suficientemente amplia para reflejar cambios sustantivos, pero lo bastante simple como para ser comprendida e implementada por PYMES con recursos limitados, y están alineados con modelos revisados en la literatura y con las capacidades reales observadas en el diagnóstico del contexto local.

Ahora al llevar estos niveles a cada una de las dimensiones tenemos la Tabla 25. *Niveles de madurez por dimensión*, que cuenta como estos niveles se adaptan a cada una de las dimensiones determinadas previamente y cómo se percibe la madurez para cada dimensión o área de la empresa respectivamente

Tabla 25. *Niveles de madurez por dimensión*

Dimensión	Nivel de madurez	Descripción del Nivel
Estrategia y liderazgo	Inicial	Ausencia de estrategias formales relacionadas con la adopción de tecnologías de la industria 4.0
	Básico	Estrategias incipientes enfocadas en resolver problemas puntuales. Liderazgo con bajo compromiso
	Intermedio	Definición de objetivos estratégicos relacionados con la transformación digital
	Avanzado	Estrategias bien definidas, alineadas con la visión empresarial y apoyo activo del liderazgo.
Personas o empleados	Inicial	Empleados sin conocimiento sobre tecnologías de la industria 4.0
	Básico	Capacitación limitada, centrada en herramientas básicas
	Intermedio	Capacitación continua, con empleados familiarizados con herramientas tecnológicas relevantes
	Avanzado	Empleados capacitados en tecnologías avanzadas y alineados con la transformación digital
Infraestructura tecnológica	Inicial	Infraestructura obsoleta y carente de conectividad
	Básico	Infraestructura básica con algunas herramientas digitales independientes
	Intermedio	Infraestructura funcional con sistemas integrados en áreas específicas
	Avanzado	Infraestructura avanzada, con conectividad entre procesos y uso de IoT en algunos casos
Inversión y financiamiento	Inicial	Inversión mínima en tecnologías, limitada a mantenimiento de infraestructura existente.
	Básico	Presupuesto asignado a proyectos específicos, pero de manera inconsistente
	Intermedio	Financiamiento moderado, con estrategias para acceder a incentivos o programas de apoyo
	Avanzado	Inversión significativa y sostenida, con acceso a fuentes diversificadas de financiamiento
Gestión de datos y ciberseguridad	Inicial	Sin estrategias para la gestión de datos o la protección de información
	Básico	Almacenamiento básico de datos, con medidas mínimas de ciberseguridad
	Intermedio	Uso moderado de análisis de datos y estrategias iniciales de protección de información
	Avanzado	Sistemas de integración de datos y protocolos avanzados de ciberseguridad

Nivel de digitalización de procesos	Inicial	Procesos completamente manuales y asilados
	Básico	Digitalización de algunos procesos, sin integración entre ellos
	Intermedio	Digitalización parcial con integración limitada en áreas clave
	Avanzado	Digitalización avanzada con procesos interconectados y optimizados
Innovación y adaptabilidad	Inicial	Baja capacidad para adaptarse a cambios o implementar nuevas tecnologías
	Básico	Innovación limitada a soluciones reactivas para problemas existentes
	Intermedio	Adopción de tecnologías nuevas en algunas áreas y actitud proactiva frente a cambios
	Avanzado	Cultura de innovación presente en toda la organización, con alta adaptabilidad a cambios

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación constituyen el conjunto de elementos observables o medibles que permiten determinar el grado de avance de una organización en cada dimensión del modelo de madurez. Tal como se plantea Schumacher et al., (2016b), un modelo de madurez debe evaluarse de manera objetiva a través de diferentes técnicas que permitan que este análisis evalúe aspectos particulares mediante escalas ordinales, con el fin de traducir conceptos abstractos en variables operativas. Este principio también es respaldado por Mittal, Romero, et al., (2018), quienes destacan la utilidad de los modelos de madurez para convertir capacidades organizacionales en elementos evaluables.

Así mismo, De Bruin et al., (2005) señalan que la calidad de un modelo de madurez reside en la claridad con la que se definen sus dimensiones, niveles y criterios, y en su capacidad para ser validados empíricamente. Hoffmann et al., (2022) complementa esta idea enfatizando la necesidad de diseñar modelos con criterios que puedan ser usados en prácticas reales de evaluación organizacional, especialmente en contextos de mejora continua.

En esta investigación, la construcción de los criterios de evaluación se realizó mediante la integración de:

- La revisión de literatura sobre modelos de madurez y sus enfoques de medición.
- El análisis de dimensiones y niveles previamente definidos (Ver Secciones 3.2 y 3.2.4).
- La caracterización de la empresa tipo, que permitió identificar indicadores realistas y pertinentes en el contexto de las PYMES agroalimentarias del municipio de Aldana, Nariño.
- El diagnóstico territorial, que evidenció brechas y oportunidades clave en la adopción de tecnologías digitales, formación de procesos, inversión y liderazgo.

3.3.1 Estructura de los criterios

Cada dimensión del modelo cuenta con cuatro niveles de madurez, representados mediante descripciones cualitativas que definen el grado de avance de la organización en relación con una determinada capacidad. Para cada nivel se establece un conjunto de condiciones observables que permitan clasificar la situación evaluada.

A fin de operacionalizar estas dimensiones, se definieron ítems específicos que actúan como unidades de observación. Cada ítem se evalúa en una escala Likert de 1 a 5 siguiendo la lógica de los modelos de madurez (Schumacher et al., 2016b):

1: No implementado

2: Implementado de forma parcial

3: Implementado de manera sistemática

4: Desarrollado e implementado

5: Altamente desarrollado, integrado y optimizado.

- ***Asignación de pesos a los ítems***

Para garantizar que cada ítem dentro de una dimensión contribuya de forma proporcional al cálculo del nivel de madurez, se asignan pesos relativos (P_{ij}). Los pesos asignados a los ítems dentro de cada dimensión fueron definidos considerando tres factores clave: (1) su relevancia según la literatura especializada en modelos de madurez (Schumacher et., al 2016; Mittal et., al 2018; (Blatz et al., 2018); Blatz et al., 2018). (2) Su impacto crítico identificado en el diagnóstico territorial realizado en el Municipio de Aldana, Nariño y (3) su grado de contribución al avance hacia una mayor madurez según la caracterización de la empresa tipo.

La asignación de pesos también se realizó pensando en que un modelo de madurez tiende a fallar si es demasiado complejo y en consecuencia su aplicación no se lograría de forma eficaz (Schumacher & Sihn, 2020) Por lo tanto, se quiso transformar en algo totalmente entendible para cualquier persona que este a cargo de realizar un estudio como estos a PYMES Manufactureras del sector agroalimentario.

A continuación se detallan los pesos asignados y la justificación de cada ítem por dimensión.

Tabla 26. *Pesos ítems*

Dimensión (i)	Ítem (j)	Peso asignado	Justificación
1. Estrategia y Liderazgo.	1.Existe una estrategia definida para la transformación digital.	0.4	Se prioriza por ser el elemento rector que orienta todos los esfuerzos de

			adopción tecnológica.
	2.La alta dirección promueve activamente la adopción de tecnologías.	0.3	Su peso refleja su importancia como motor del cambio, aunque subordinado a la estrategia formal.
	3.La visión digital está alineada con los objetivos del negocio.	0.3	Su alineación aporta a la coherencia organizacional, pero se considera consecuencia de los anteriores.
2.Infraestructura tecnológica	1.Conectividad adecuada	0.5	Condición habilitante básica. Su ausencia limita cualquier otro avance.
	2.Equipos y herramientas digitales	0.3	Son necesarios, pero sin conectividad su efectividad es limitada.
	3.Integración de nuevos sistemas tecnológicos	0.2	Requiere de condiciones previas como las dos anteriores para ser viable.
3.Nivel de digitalización de procesos	1.Documentación y estandarización de procesos	0.3	Es el punto de partida para digitalizar con eficiencia.
	2.Uso de herramientas digitales para ejecutar y monitorear procesos	0.4	Refleja el avance efectivo en la operación.
	3.Interconexión de procesos entre áreas	0.3	Aunque clave para madurez avanzada, depende de los anteriores.
4.Personas o empleados	1.Formación básica en TIC	0.4	Fundamental para iniciar cualquier proceso de digitalización.

	2.Planes de capacitación en tecnologías emergentes	0.3	Clave para avanzar hacia niveles medios y altos.
	3.Cultura de innovación y aprendizaje continuo	0.3	Favorece sostenibilidad, aunque su impacto es difuso.
5.Inversión y financiamiento	1.Presupuesto específico para tecnología	0.4	Refleja compromiso institucional.
	2.Búsqueda activa de financiamiento externo	0.3	Mejora las posibilidades de ejecución.
	3.Inversión tecnológica como parte del plan estratégico	0.3	Alinea recursos con estrategia.
6.Gestión de datos y ciberseguridad	1.Almacenamiento y organización de datos digitales	0.3	Requisito básico.
	2.Medidas de seguridad básicas	0.3	Relevantes para evitar riesgos operativos.
	3.Uso de datos para decisiones estratégicas	0.4	Refleja un nivel superior de aprovechamiento de los datos.
7.Innovación y adaptabilidad	1.Mejoras continuas en productos o procesos	0.4	Es el indicador directo de acción innovadora.
	2.Promoción interna de ideas innovadoras (C)	0.3	Crea condiciones organizacionales favorables.
	3.Capacidad de adaptación a cambios	0.3	Refleja la resiliencia operativa.

Fuente: Elaboración propia.

La suma de los pesos por dimensión es igual a 1, lo que garantiza su normalización para el cálculo ponderado. Esta asignación permite que el modelo refleje tanto la estructura teórica como la realidad operativa de las PYMES agroalimentarias en el territorio estudiado.

Una vez se cuenta con los pesos asignados a cada uno de los ítems de las dimensiones, y se han recolectado los datos a través de los cuestionarios aplicados a los gerentes de las empresas, se procede al cálculo del nivel de madurez correspondiente a cada dimensión. Este cálculo se realiza aplicando la fórmula de evaluación ponderada, que

integra tanto las calificaciones asignadas por los evaluadores como los pesos relativos definidos en la Tabla 26. *Pesos ítems* para cada Ítem.

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^{n}(C_{ji} * P_{ji})}{\sum_{i=1}^{n} P_{ji}}$$

Donde:

μ_j: $Madurez\ de\ la\ Dimensión\ j$

C_{ji}: $Calificación\ del\ item\ i\ en\ la\ dimensión\ j$

Pji: $Peso\ del\ item\ i\ en\ la\ dimensión\ j$

- ***Interpretación de resultados: semáforo de madurez***

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos en cada dimensión, se establece una escala de niveles de madurez con base en un esquema de semáforo, el cual permite clasificar visualmente el grado de avance de la empresa de acuerdo con los siguientes rangos:

Tabla 27. *Semáforo de madurez*

Nivel de madurez (puntaje)	Nivel	Color	Interpretación resumida
1.00 – 1.99	Inicial	🔴	La dimensión presenta condiciones mínimas o inexistentes.
2.00 – 2.99	Básico	🟠	Hay avances iniciales, pero se requiere intervención urgente.
3.00 – 3.99	Intermedio	🟡	Existe progreso funcional, con áreas pendientes por mejorar.
4.00 - 5.00	Avanzado	🟢	La dimensión se encuentra consolidada y ya en evolución.

Fuente: Elaboración propia.

Este semáforo de madurez puede aplicarse tanto a nivel de cada dimensión como a nivel de madurez global, permitiendo identificar áreas prioritarias de intervención y establecer planes de mejora progresiva.

3.3.2 Instrumento de recolección de datos: Cuestionario de evaluación

Con el objetivo de medir el nivel de madurez digital de las PYMES manufactureras del sector agroalimentario, se diseñó un cuestionario estructurado como instrumento principal de recolección de datos. Este instrumento se aplicará a gerentes, propietarios o

responsables operativos de las empresas objeto de estudio, y tiene como finalidad valorar cada uno de los ítems definidos dentro de las dimensiones del modelo.

Estructura del cuestionario

Formato: Escala tipo Likert de 1 a 5.

Contenido: 7 secciones, una por cada dimensión del modelo.

Total de Ítems: 21 (3 por dimensión)

Modo de aplicación: Entrevista estructurada.

El cuestionario en su totalidad lo encontramos en el ANEXO E, pero a continuación se muestra una parte del cuestionario que se centra en la dimensión 1 (estrategia y liderazgo).

Dimensión 1 → Estrategia y liderazgo

Indique su grado de implementación de las siguientes afirmaciones (1: No implementado , 5: Totalmente implementado).

Tabla 28. *Ejemplo cuestionario*

Ítem	**Calificación**
Existe una estrategia definida para la transformación digital.	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐
La alta dirección promueve activamente la adopción de tecnologías.	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐
La visión digital está alineada con los objetivos del negocio.	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐

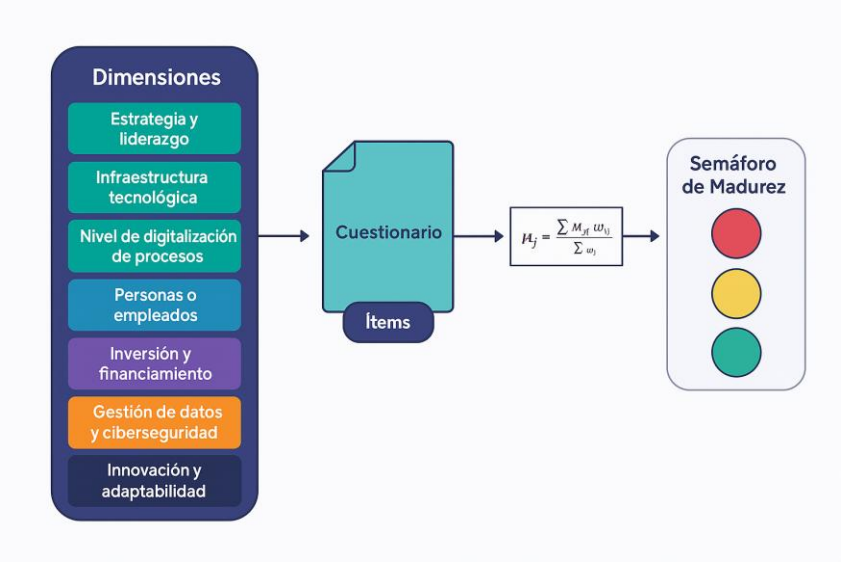
Fuente: Elaboración propia

Las respuestas recolectadas serán transformadas numéricamente según la escala seleccionada y procesadas mediante la fórmula de ponderación definida en (1) (Ver Sección 3.3.2), permitiendo determinar el valor de madurez por dimensión y el nivel global de madurez de la empresa evaluada.

3.4 Modelo de madurez

La **Figura 19.** *Visualización del Modelo de Madurez* presenta una representación visual del modelo de madurez propuesto. Este esquema sintetiza gráficamente los elementos clave del modelo y su articulación metodológica, facilitando su comprensión y aplicación práctica en las empresas evaluadas.

Figura 19. *Visualización del Modelo de Madurez*



Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

La Figura 19. *Visualización del Modelo de Madurez* muestra una síntesis visual del modelo de madurez, representando todo el proceso metodológico de evaluación en una secuencia lógica y visualmente amigable. En primer lugar, tenemos el bloque izquierdo que agrupa las 7 dimensiones consideradas del modelo de madurez. Estas dimensiones representan las áreas críticas que deben ser evaluadas para conocer el grado de avance de una empresa en su transformación digital.

Cada dimensión agrupa 3 ítems que desarrollan un área de desarrollo de la industria 4.0 dentro de la organización, para dichos ítems se determinó un peso específico (ver sección 3.3.1). En la parte central de la Figura 19 se encuentra los instrumentos de recolección de datos, que en este caso, son cuestionarios dirigidos a los gerentes o responsables de las empresas y con los pesos de los ítems tenemos la información de entrada para el cálculo del valor de madurez para cada dimensión a través de la fórmula (1). Una vez obtenido el resultado de la fórmula, se interpreta mediante un semáforo de madurez, que clasifica el resultado de la dimensión obtenido según los niveles 1: inicial, 2: básico, 3: Intermedio, 4: Avanzado, mediante un código de colores (ver Tabla 27. *Semáforo de madurez*).

4. Validación del modelo

En esta sección se presenta la validación empírica del modelo de madurez desarrollado en el capítulo anterior. El objetivo principal es comprobar su aplicabilidad en su entorno real, evaluando su utilidad como herramientas diagnósticas en empresas agroalimentarias del municipio de Aldana, Nariño.

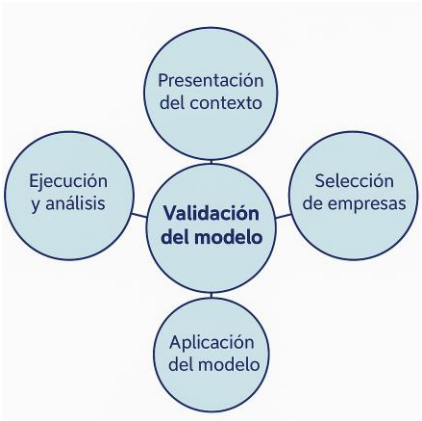
La validación se realizará mediante la implementación del modelo en empresas seleccionadas, con el fin de analizar su efectividad, identificar posibles mejoras, y asegurar su pertinencia frente a las condiciones reales del territorio. Esta comprobación permitirá evaluar el nivel de preparación de las PYMES para la transición hacia la industria 4.0, así como los aspectos que requieren fortalecimiento para avanzar en su transformación digital.

El capítulo se estructura en cinco apartados principales:

- Presentación del contexto geográfico del municipio de Aldana, y su actividad agroindustrial.
- Descripción de las empresas seleccionadas para la validación.
- Aplicación del instrumento mediante visitas a las empresas.
- Ejecución y análisis del modelo a partir de los datos obtenidos.

La Figura 20, ilustra la metodología aplicada para el desarrollo de este proceso de validación, desde el acercamiento inicial hasta la ejecución final del modelo.

Figura 20. *Metodología del capítulo.*



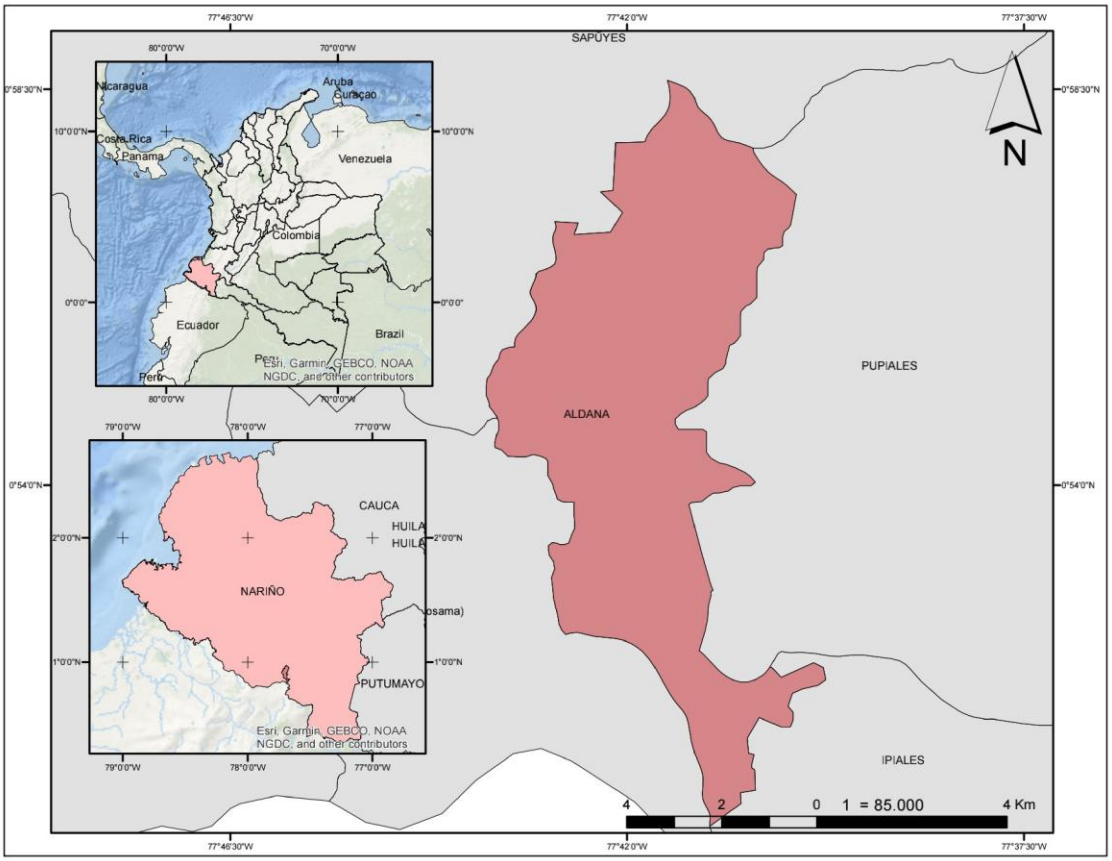
Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

4.1 Contexto Geográfico

El municipio de Aldana, situado en el altiplano de Túquerres-Ipiales, en el suroccidente de Colombia, específicamente en el departamento de Nariño (Ver Figura 22). Situado a más de 3.000 metros sobre el nivel del mar, Aldana presenta una temperatura promedio de 10°C. Este territorio, reconocido como el Resguardo Indígena de Pastas (Comunidad de los Pastos, 2017), conserva un profundo arraigo histórico y cultural con la comunidad indígena de los Pastos. Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Aldana limita al norte con el municipio de Guachucal, al occidente con los municipios de Guachucal y Cuaspud, al sur con el municipio de Ipiales, y al oriente con el municipio de Pupiales.

Aldana se caracteriza por su economía basada en el sector agropecuario, siendo la producción agrícola y ganadera las principales actividades económicas.

Figura 21. *Mapa, Aldana, Nariño*



Fuente: Elaboración propia usando Argis®

4.1.1 Caracterización del sector económico aldanense

El municipio de Aldana presenta una economía caracterizada por la interacción entre los sectores agropecuario, comercial y manufacturero. Según el Plan de Desarrollo Aldana, Un Proyecto de Vida., (2020), en el municipio existen 159 establecimientos comerciales registrados en industria y comercio, distribuidos en diversas categorías, entre las cuales se incluyen 10 almacenes agropecuarios, 8 asaderos, 2 salas de internet y comunicaciones, 9 cafeterías, 5 restaurantes, 3 cerrajerías, 12 peluquerías, 9 droguerías, 3 ferreterías, 7 venta de frutas y verduras, 10 graneros, 3 bares, 3 discotecas, 5 almacenes de variedades, 2 empresas de transporte, 20 tiendas, 8 empresas de servicios, 10 venta de ropa, 3 papelerías, 8 venta de licores, 1 empresa de artesanías, 1 empresa de creación audiovisual, 7 establecimientos de servicios , 7 carnicerías, 1 bomba de gasolina, 2 empresas manufactureras.

- ***Composición empresarial y tamaño de las empresas***

Dentro del tejido empresarial de Aldana predominan los establecimientos de pequeña escala, en su mayoría clasificados como microempresas. Muchas de estas operan bajo estructuras informales, sin estar registradas en la Cámara de Comercio de Ipiales, ni contar con certificaciones legales. Sin embargo, también existen empresas formalmente constituidas que han logrado consolidarse en sectores clave como la manufactura alimentaria y el comercio minorista.

- ***Principales sectores económicos***

Sector Agropecuario → La actividad agropecuaria en Aldana está fuertemente vinculada a la producción agropecuaria. Su geografía montañosa y clima frío facilitan el cultivo de productos como papa, cebolla, haba y trigo, los cuales abastecen tanto el consumo local como mercados regionales. Además, la ganadería desempeña un papel fundamental, con una fuerte presencia de la producción lechera y cárnica, que impulsa la existencia de empresas lácteas y cárnicas en la zona.

Sector Manufacturero → A pesar de que la manufactura en Aldana es limitada en comparación con otros municipios, existen empresas que han logrado consolidarse en este sector. Entre ellos se destacan:

Industrias Muchitaa S.A.S., especializada en la producción y comercialización de papas fritas tipo chips en diferentes variedades.

Lácteos Fresco, empresa dedicada a la producción y distribución de productos lácteos, especialmente quesos en diferentes variedades.

- ***Sector comercial y de servicios***

El sector comercial está compuesto principalmente por tiendas de barrio, graneros y almacenes de venta de insumos agropecuarios. Asimismo, el sector de servicios ha experimentado un crecimiento con la presencia de peluquerías, barberías, restaurantes y establecimientos de entretenimiento, como bares y discotecas (Quitiaquez, 2023). En

menor escala, también se encuentran emprendimientos en el ámbito de las artesanías y la creación audiovisual.

- ***Impacto Económico y Generación de empleo***

La economía de Aldana es mayormente dependiente del sector agropecuario, el cual representa la principal fuente de empleo para la población local. Las empresas manufactureras y de servicios también generan oportunidades laborales, aunque en menor medida. No obstante, la falta de capacitación en tecnologías avanzadas y la informalidad empresarial limitan la creación de empleo de calidad y el acceso a mercados más competitivos.

- ***Infraestructura y Desarrollo Económico***

Accesibilidad y conectividad → El municipio cuenta con una red vial que permite el transporte de productos hacia mercados cercanos, pero la infraestructura presenta deficiencias, especialmente en las vías rurales.

Servicios Públicos → El acceso a electricidad, agua potable y telecomunicaciones es aceptable en la cabecera municipal, pero en zonas rurales existen limitaciones que afectan el desarrollo empresarial.

Desarrollo digital → La digitalización de los negocios es baja, con un acceso limitado a plataformas digitales y escasa automatización de procesos.

4.2 Selección de Empresas

Para la validación del modelo como tal, se necesita empresas manufactureras del sector agroalimentario del municipio de Aldana que puedan servir como unidades piloto para aplicar el instrumento diseñado. La selección de estas organizaciones se realiza con base en los siguientes criterios de inclusión, definidos para asegurar la pertinencia y representatividad del ejercicio de validación:

Legalmente Constituidas → La empresa de contar con registro mercantil vigente y estar formalmente reconocida ante las autoridades correspondientes ya que esto indica que la empresa tiene una estructura organizativa definida, buscando un proceso productivo estandarizado.

Sector agroalimentario → Su actividad económica principal debe estar relacionada con la producción, transformación o comercialización de productos agrícolas y/o alimentarios (por ejemplo: café, lácteos, frutas, tubérculos, etc.).

Clasificación en pequeña o mediana empresa → Según el número de empleados, ingresos activos, conforme a la normativa legal vigente.

Operación activa→ La empresa debe estar en funcionamiento regular al momento de aplicar el modelo, desarrollando actividades productivas de manera continua.

Estructura organizativa → Debe existir al menos un responsable o representante legal con capacidad de responder el cuestionario y proporcionar información básica.

4.2.1 Industrias Muchitaa S.A.S.

Industrias Muchitaa S.A.S. es una empresa ubicada en la vereda La Laguna del municipio de Aldana, departamento de Nariño. Constituida como una Sociedad por Acciones Simplificada (S.A.S), se dedica principalmente a la elaboración de alimentos, en específico, papas fritas tipo chips, de diferentes sabores, pollo, limón, etc. La empresa también participa en el comercio al por menor de diversos productos alimenticios en establecimientos especializados. Clasificada como una Pequeña empresa, Industrias Muchitaa S.A.S. forma parte del sector agroalimentario de Aldana, contribuyendo al desarrollo económico local. La empresa está registrada bajo el NIT 9015676216.

Esta empresa surge como una iniciativa empresarial orientada a la transformación de productos agroalimentarios, con especial enfoque en la producción de papas fritas tipo chips en diferentes variedades y sabores como pollo, limón, etc. La creación de esta empresa responde a la necesidad de generar valor agregado a los cultivos de papa de la región, fomentando el desarrollo de la industria local y ofreciendo alternativas comerciales innovadoras para los productores agrícolas, cuenta con 4 trabajadores en estos momentos.

Desde su fundación, Industrias Muchitaa S.A.S. ha trabajado en consolidar su presencia en el mercado regional, apostando por la calidad artesanal y el aprovechamiento de materias primas locales. Su crecimiento ha sido progresivo, caracterizado por la adopción de procesos productivos semiautomatizados y manuales, y la consolidación de un nicho de mercado que valora los productos con identidad territorial y elaboración tradicional.

- ***Estructura organizativa y operativa***

Industrias Muchitaa S.A.S. se encuentra como una pequeña y mediana empresa dentro del sector agroalimentario. Su equipo de trabajo está conformado por personal local, destacando la participación de productores agrícolas y operarios encargados de los diferentes procesos de producción y comercialización. La empresa cuenta con un esquema organizativo flexible, donde las decisiones estratégicas son tomadas por los fundadores y gerentes, mientras que las actividades operativas son gestionadas por un equipo reducido pero altamente comprometido con la visión empresarial.

En términos operativos, Industrias Muchitaa S.A.S. es una empresa de la índole artesanal, por lo cual no tienen como tal una estandarización de sus procesos productivos, es decir, la producción de papas fritas se lleva a cabo mediante un proceso mixto que combina maquinaria básica con actividades manuales. Destaca el control de calidad de las papas, realizado manualmente por operarios, quienes seleccionan las mejores materias primas

para garantizar un producto final óptimo (Ver Figura 24). Esta metodología de trabajo refuerza el carácter artesanal de la empresa y la diferencia de otros competidores en el mercado.

Figura 22. *Logo Industrias Muchitaa S.A.S.*

Fuente: Tomado de la página del EcoSistema Regional de Innovación Social ERIS https://eris.narino.gov.co/innova-municipio?identificador=Mg%3D%3D&municipio=Aldana&utm.

- ***Mercado y Competencia***

Industrias Muchitaa S.A.S. opera principalmente en el mercado laboral y regional, distribuyendo sus productos en tiendas, supermercados y ferias agroalimentarias en Nariño. Su público está compuesto por consumidores que buscan productos de calidad con un enfoque más artesanal y con identidad local.

La competencia dentro del sector de snacks y productos agroindustriales es significativa, ya que existen marcas reconocidas con una presencia consolidada en el mercado nacional. Sin embargo, Industrias Muchitaa S.A.S. ha encontrado su diferenciación a través de la producción artesanal, y una estrategia en marketing considerable, la utilización de insumos locales y la personalización de sabores. La empresa también enfrenta competencia de otros pequeños productores de papa frita, aunque su registro legal y mejora continua de procesos le otorgan una ventaja competitiva en términos de formalidad y acceso a mercados más estructurados.

- ***Tecnología y Procesos***

Industrias Muchitaa S.A.S. realiza un proceso productivo enfocado en la transformación de papa frita tipo chips con valor agregado en sabores. El flujo de producción de la empresa se compone de las siguientes etapas principales

Figura 23. *Proceso Productivo Industrias Muchitaa S.A.S.*

Fuente: Elaboración propia usando draw.io®

En primer lugar, se recibe la papa fresca, la cual pasa por un proceso de selección primaria y clasificación según su calidad para iniciar su transformación. A continuación, se eliminan las impurezas y la cáscara mediante maquinaria especializada. Posteriormente, las papas seleccionadas son cortadas en láminas finas utilizando cortadoras industriales. Estas láminas pasan por un proceso de desalmidonado, que incluye enjuague y remojo técnico, seguido de una etapa de centrifugado para extraer el exceso de agua antes de la fritura. Luego, se realiza la cocción en aceite caliente controlado, con el fin de obtener la textura crocante característica del producto. Una vez fritas, las papas son sometidas a una inspección visual para descartar aquellas que presenten imperfecciones. Posteriormente, se aplica el saborizante en polvo, y el producto es dosificado automáticamente en empaques individuales. Estos son sellados mediante máquinas especializadas y agrupados en paquetes por docena. Finalmente, los productos terminados se almacenan en condiciones adecuadas que garantizan su conservación hasta el momento de su distribución y comercialización.

A pesar de contar con algunos equipos industriales, el proceso presenta un grado limitado de automatización, y que varias actividades se realizan de forma manual o semiautomatizada. El control de variables como la temperatura del aceite o el tiempo de fritura, por ejemplo, depende en gran medida de la experiencia del operario. Tampoco se cuenta con integración digital entre etapas ni sistemas de monitoreo en tiempo real.

Este tipo de configuración operativa mezcla procesos tradicionales con elementos tecnológicos puntuales, se puede clasificar como semiautomática y de tipo semiartesanal, característica común en PYMES agroalimentarias de origen rural. Esta condición representa tanto un desafío como una oportunidad para implementar estrategias de transformación digital gradual, priorizando aquellas tecnologías que aporten valor sin comprometer la identidad y flexibilidad del modelo productivo.

4.2.2 Lácteos Fresco

Es una empresa legalmente constituida en el municipio de Aldana, Nariño, dedicada a la producción y comercialización de productos lácteos frescos, tales como quesos, yogurt, crema de leche, cuajada y otros derivados lácteos. Su actividad se desarrolla en un entorno rural, lo cual le permite de manera cercana con los productores de leche locales, fortaleciendo así el encadenamiento productivo de la región. La empresa combina prácticas tradicionales con procesos de mejora continua, buscando posicionarse como una organización líder del sector líder en la región.

Figura 24. *Lácteos Fresco Imagen corporativa*

Fuente: Lácteos Fresco.

Misión

Producir y comercializar productos lácteos de alta calidad, promoviendo prácticas sostenibles y responsables en cada etapa de nuestra cadena de producción. Nos comprometemos a brindar frescura, sabor y valor nutritivo, contribuyendo al bienestar de nuestra región.

Visión

Ser reconocidos como líderes en la industria láctea, innovando constantemente en nuestros procesos y productos para ofrecer opciones saludables y sostenibles. Aspiramos a construir relaciones de confianza con nuestros clientes, proveedores y comunidades, convirtiéndonos en un referente de calidad y compromiso en el mercado lácteo nacional e internacional.

- ***Estructura Organizativa y operativa***

Lácteos Fresco presenta una estructura organizativa tipo funcional con jerarquía clara. La empresa cuenta con un total de 39 personas distribuidas entre personal administrativo, operarios, personal de calidad, transporte y logística.

El esquema general está conformado por:

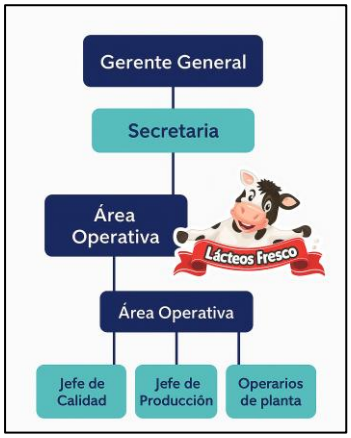
Gerente General → Encargado de la dirección estratégica, planificación y supervisión general.

Secretaria → Responsable de la gestión documental, apoyo administrativo y coordinación básica de actividades.

Área operativa → Compuesta por jefe de calidad, jefe de producción, operarios de planta, conductores del carro tanque y distribuidores de ruta.

Este modelo organizativo permite una gestión eficiente, garantizando la trazabilidad, control de calidad y cumplimiento de las normativas sanitarias en cada etapa del proceso.

Figura 25. *Organigrama Lácteos Fresco*



Fuente: Lácteos Fresco.

- ***Mercado y competencia***

Lácteos Fresco atiende principalmente el mercado local y regional, abasteciendo tiendas, supermercados y clientes institucionales en los municipios aledaños, mediante la distribución directa y acuerdos con puntos de venta locales. Su propuesta de valor se basa en la frescura, calidad artesanal y sabor característico de sus productos. En cuanto a competencia, la empresa enfrenta tanto productores artesanales informales como marcas industriales regionales, lo que representa un desafío constante en cuanto a diferenciación, fidelización y escalabilidad. La cercanía con el cliente final es uno de sus principales activos comerciales.

- ***Tecnología y procesos***

Lácteos Fresco desarrolla su actividad productiva mediante un esquema de manufactura semiartesanal de mediana escala, en el que se integran técnicas tradicionales con el uso de equipos básicos y un bajo grado de automatización. La empresa procesa un promedio de 14.000 litros de leche diarios, lo que evidencia un nivel de operación considerable dentro del sector lácteo regional.

El proceso productivo inicia con la recepción de la materia prima, transportada en carro tanque desde fincas proveedoras locales. A su llegada a planta, la leche pasa por un proceso de evaluación en laboratorio, donde se determina principalmente su nivel de acidez. Este parámetro permite decidir su destino productivo, orientando su uso hacia la elaboración de quesos frescos, cuajadas, yogurt, crema de leche, entre otros.

A pesar de disponer de algunos equipos semiautomáticos como tinas de cuajado, prensas y cámaras de refrigeración, gran parte de las operaciones se realiza de forma manual. Por ejemplo, el control de temperatura en procesos clave se efectúa mediante termómetros manuales, manipulados por los operarios, y no mediante sensores digitales ni dispositivos conectados.

La gestión de registros de trazabilidad, control de calidad e inventarios se realiza con hojas de cálculo o formatos físicos, sin la integración de sistemas ERP ni herramientas digitales avanzadas. El uso de técnicas tradicionales, como el modelado manual de queso, el control empírico de tiempos y temperaturas, y el seguimiento sensorial del producto, permite conservar un enfoque centrado en la calidad artesanal, pero también representa un reto y una oportunidad para avanzar hacia una manufactura digital más eficiente. A continuación se describe el flujo general del proceso:

Figura 26. *Proceso productivo Lácteos Fresco*

Fuente: Elaboración propia usando Canva.

La leche es recolectada diariamente y transportada hasta la planta en un carro tanque. A su llegada, se realiza una revisión inicial de condiciones como temperatura, olor y apariencia. Posteriormente, se evalúa el grado de acidez de la leche mediante un acidómetro. Este paso es fundamental para garantizar la inocuidad del producto y determinar su destino dentro del proceso. Según el nivel de acidez identificado, la leche es clasificada y dirigida a la línea de producción correspondiente. Por ejemplo, la leche con acidez controlada se destina a la elaboración de quesos frescos, cuajadas, mientras que otra puede utilizarse para derivados con procesos fermentativos o pasteurizados. Según donde la envíen, la leche puede someterse a un proceso térmico de pasteurización, con el objetivo de eliminar patógenos y asegurar la calidad sanitaria del producto. Este proceso se controla manualmente por medio de termómetros convencionales.

Luego de la pasteurización, la leche o los productos derivados se enfrían a temperaturas adecuadas para su posterior manipulación y moldeado. En el caso de queso y cuajada una vez formado el cuajo y alcanzada la consistencia deseada, el producto es desmoldado de manera manual, y en algunos casos, prensado según el tipo de queso que se elabora. Posteriormente, los productos son empacados en presentaciones individuales por peso, utilizando maquinaria básica de sellado. Algunas líneas cuentan con selladoras manuales o semiautomáticas. Finalmente, los productos son almacenados en cámaras frías que garantizan la conservación de sus propiedades hasta el momento de su distribución.

4.3 Aplicación del Modelo

La aplicación del modelo de madurez se realizó en las empresas seleccionadas del sector agroalimentario del municipio de Aldana, Nariño, con el objetivo de evaluar su grado de avance en la adopción de tecnologías asociadas a la Manufactura Digital, así como comprobar la pertinencia y utilidad del instrumento desarrollado.

4.3.1 Instrumento Aplicado

El modelo se operacionalizó mediante un cuestionario (ANEXO D) estructurado de 21 ítems, distribuidos en 7 dimensiones clave (ver Sección 3.3). Este instrumento fue diseñado con una escala tipo Likert 1 a 5, que mide el grado de implementación de prácticas organizativas, tecnológicas y estratégicas en cada dimensión del modelo.

El cuestionario fue aplicado de manera presencial, mediante entrevistas estructuradas con los responsables operativos o gerentes generales de cada empresa participante. La duración promedio de cada aplicación fue de aproximadamente 45 minutos.

4.3.2 Proceso de recolección de datos.

La recolección de información se llevó a cabo siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Coordinación previa con los representantes de cada empresa para concertar la visita y explicar el objetivo del estudio.

2. Firma del consentimiento informado, garantizado la confidencialidad y uso académico de la información recolectada.

3. Aplicación del cuestionario, guiada por el investigador, permitiendo aclaraciones si eran necesarias.

4. Registro y sistematización de las respuestas en una hoja de cálculo, para posterior procesamiento.

Durante la aplicación se documentaron observaciones cualitativas relevantes sobre la interpretación de los ítems, disposición del evaluado y condiciones del entorno de trabajo.

4.3.3 Procesamiento y análisis de resultados

Con base en las respuestas obtenidas, se realizó el cálculo del nivel de madurez para cada dimensión utilizando la fórmula definida en la sección 3.3:

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^{n}(C_{ji} * P_{ji})}{\sum_{i=1}^{n} P_{ji}}$$

4.4 Ejecución y Análisis de los datos obtenidos

La validación del modelo de madurez se llevó a cabo directamente en las empresas seleccionadas, mediante un proceso de acercamiento con los gerentes o personas responsables de la operación. Esta estrategia permitió aplicar el instrumento de forma contextualizada y con conocimiento directo de las realidades organizativas.

Este contacto cercano con las empresas enriqueció el ejercicio de validación, ya que facilitó la comprensión profunda de sus fortalezas y debilidades en términos de adopción de herramientas digitales. A su vez, permitió identificar con mayor precisión las oportunidades de mejora que podrían contribuir a incrementar su eficiencia operativa y competitividad en el marco de la transformación hacia la Industria 4.0.

4.4.1 Validación en Industrias Muchitaa S.A.S.

Se aplicó presencialmente el cuestionario (ver Anexo D). El instrumento fue aplicado durante una visita a las instalaciones de la empresa. La persona entrevistada fue el gerente general y fundador de la organización, ingeniero Diego Fernando Quitiaquez, quien actualmente lidera todos los procesos operativos y administrativos.

Durante el encuentro, se llevó a cabo un dialogo inicial donde el entrevistado compartió información relevante sobre el origen de la empresa, su visión estratégica, los productos que fabrican y su vinculación con el desarrollo local. Posteriormente, se procedió a la aplicación del cuestionario, el cual fue respondido de manera reflexiva, atendiendo a las condiciones reales de la empresa y a las preguntas formuladas con base en las siete dimensiones del modelo de madurez.

La encuesta se realizó en un ambiente colaborativo, lo cual facilitó la recopilación de información precisa. El ingeniero Quitiaquez mostró su disposición para brindar datos detallados sobre la infraestructura tecnológica, la digitalización de procesos, la inversión realizada en tecnología y la preparación del talento humano, entre otros aspectos. También se generó un espacio de retroalimentación donde se discutieron posibles oportunidades de mejora detectadas a partir del modelo.

Con los datos obtenidos se procedió al cálculo del nivel de madurez por dimensión, utilizando la fórmula (1) establecida y considerando los pesos asignados previamente a cada ítem. Este análisis permitió determinar el estado actual de la empresa frente a su preparación para la adopción de tecnologías de la Industria 4.0, y sentó las bases para construir un plan estratégico que potencie su proceso de transformación digital.

- Resultados del Modelo de Madurez

Una vez se realizó la aplicación del cuestionario al gerente general de Industrias Muchitaa S.A.S. se determinaron los siguientes niveles de madurez, tal como se muestra en la Figura 27. *Madurez General de la empresa*, en primer lugar se puede terminar que el nivel más favorecido es innovación y adaptabilidad, lo cual demuestra que la empresa tiene una

disposición clara a la innovación y se adapta de manera rápida a las circunstancias del entorno pero en contraste sus escasos recursos hace que no se pueda capitalizar dicha disposición.

Figura 27. *Madurez General de la empresa.*

Fuente: Elaboración propia.

En términos generales Industrias Muchitaa S.A.S. se encuentra en un nivel de madurez básico en la mayoría de las dimensiones. La siguiente tabla muestra en resumen el nivel de madurez de cada dimensión.

Tabla 29. *Nivel de madurez Industrias Muchitaa S.A.S.*

Dimensión	Puntaje Obtenido	Nivel de Madurez
Estrategia y Liderazgo	2.8	Básico
Infraestructura Tecnológica	3.1	Intermedio
Nivel de digitalización de procesos	1.0	Inicial
Personas o empleados	1.0	Inicial
Inversión y financiamiento	1.6	Inicial
Gestión de datos y ciberseguridad	1.0	Inicial
Innovación y adaptabilidad	4.6	Avanzado

Fuente: Elaboración propia.

Se identifica a partir de la **Tabla 29.** *Nivel de madure* que las áreas de mejora son en las dimensiones Nivel de digitalización de procesos, Personas o empleados, Inversión y financiamiento y Gestión de datos y ciberseguridad que con un puntaje mínimo de 1.0 se encuentran en el nivel de madurez más bajo (inicial). Esto sugiere que los procesos operativos aún son eminentemente manuales, con escasa incorporación de herramientas

tecnológicas, y que no existen planes estructurados de capacitación del personal ni uso sistemático de datos para la toma de decisiones.

El nivel de madurez en infraestructura tecnológica muestra que la empresa cuenta con algunos equipos y condiciones adecuadas para dar el salto hacia la digitalización, aunque aún sin alcanzar una integración plena. Finalmente Estrategia y Liderazgo así como Inversión y Financiamiento reflejan una gestión parcial del proceso de transformación digital, con algunas iniciativas pero sin un direccionamiento estratégico consolidado ni respaldo económico suficiente.

La Figura 28. *Estrategia y Liderazgo Industrias Muchitaa S.A.S.*muestra la dimensión estrategia y liderazgo donde los valores para cada ítem evaluado se encuentran entre 2 y 3, lo cual sugiere un nivel de madurez “básico” en esta dimensión. Lo que coincide con el valor cuantitativo global 2,8 obtenido.

Figura 28. *Estrategia y Liderazgo Industrias Muchitaa S.A.S.*

Fuente: Elaboración propia.

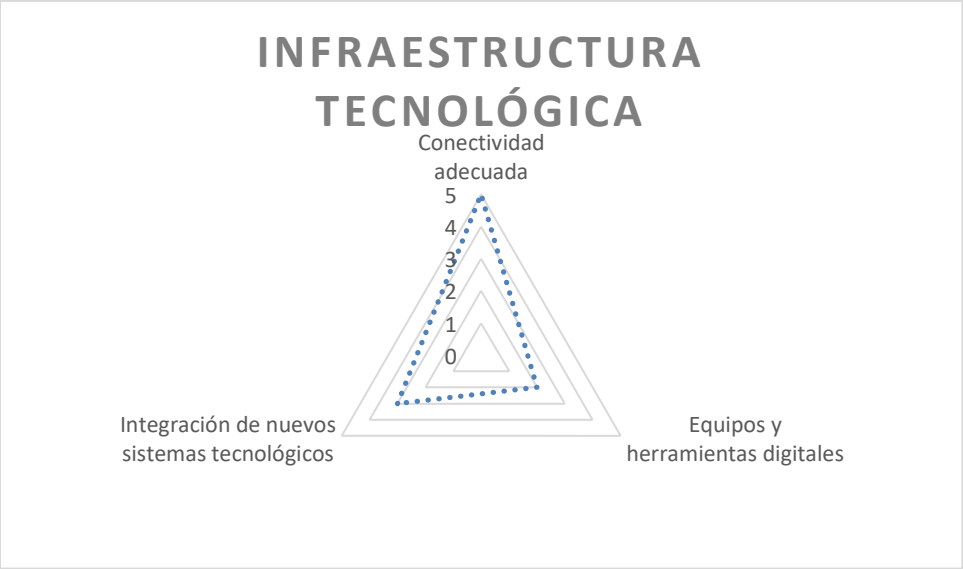
Se puede observar que en esta dimensión la organización existe cierto reconocimiento de la importancia de la transformación digital, lo cual se evidencia en una idea al menos incipiente de querer implementar una transformación digital. Pero aún falta consolidar una estrategia clara y robusta y formalizada. La alineación entre la visión digital y los objetivos del negocio parece no estar plenamente integrada, lo cual puede limitar la efectividad de cualquier esfuerzo de transformación.

Se recomienda establecer una estrategia digital formal con objetivos específicos, tiempos definidos y responsables claros.

Por otra parte la Figura 29. *Infraestructura Tecnológica de Industrias Muchitaa S.A.S.* muestra la dimensión Infraestructura Tecnológica al evaluar cada uno de los ítems que

integran esta dimensión, los valores se ubican alrededor de 3 en promedio, con mayor puntaje en conectividad y menor en integración de sistemas. Esto coincide con el valor global registrado de la dimensión que cae dentro de un nivel de madurez Intermedio.

Figura 29. *Infraestructura Tecnológica de Industrias Muchitaa S.A.S.*



Fuente: Elaboración propia.

La empresa cuenta con una infraestructura aceptable en conectividad, lo cual facilita el acceso a herramientas digitales básicas. Además dispone de equipos funcionales, probablemente semiautomatizados, lo cual apoya la operación diaria. Sin embargo, hay una baja integración de nuevos sistemas tecnológicos como sensores, IoT o softwares de control automatizado, lo que limita el aprovechamiento de capacidades de la Industria 4.0, además es notoria la ausencia de una visión sistemática de actualización tecnológica para escalar la digitalización.

Por lo tanto, se recomienda desarrollar un plan progresivo de modernización tecnológica, priorizando tecnologías con alto impacto y bajo costo de adopción. Evaluando herramientas de manufactura digital que puedan integrarse a los procesos actuales sin requerir grandes cambios estructurales.

La dimensión Nivel de Digitalización de Procesos se muestra en la Figura 30. *Nivel de digitalización de procesos en Industrias Muchitaa S.A.S.* determinan que los ítems evaluados por esta dimensión se encuentran todos en 1, es decir, no hay nada implementado sobre estos temas.

Se identifica una ausencia de herramientas digitales integradas en los procesos clave, existen procesos que no están estandarizados ni existe documentación relacionada con esto, situación que dificulta la automatización o seguimiento de la operación de la empresa.

No existe una interconexión entre áreas lo que limita la eficiencia y visibilidad operativa. El probable uso de las tecnologías básicas como hojas de cálculo, sin sistemas de gestión robustos.

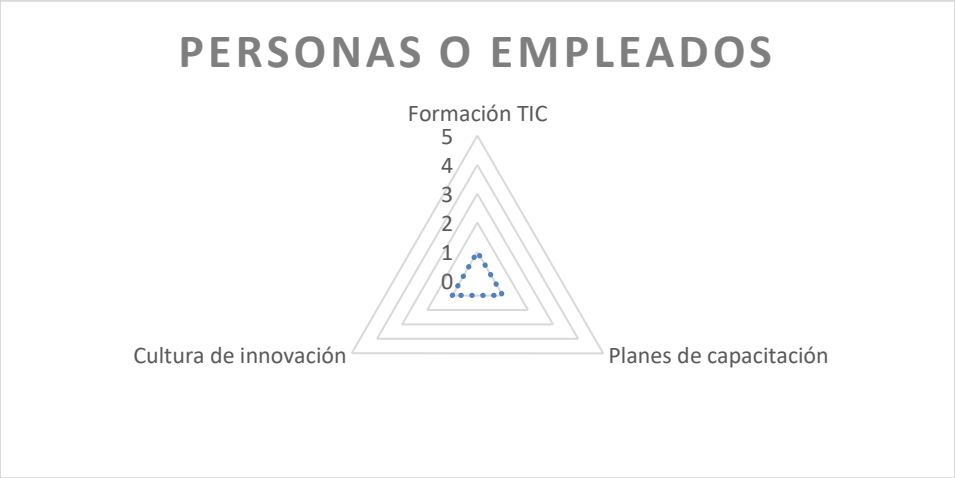
Esta dimensión es crítica, por lo cual se recomienda en primer lugar, estandarizar los procesos clave mediante manuales, flujogramas y procedimientos operativos como primer paso para digitalizar. Posteriormente, se recomienda implementar herramientas de bajo costo y alta utilidad como Software de gestión de producción promover la interconexión operativa entre áreas mediante sistemas compartidos de información o tableros visuales digitales.

Figura 30. *Nivel de digitalización de procesos en Industrias Muchitaa S.A.S.*

Fuente: Elaboración propia.

Otra de las dimensiones críticas según la Tabla 29. *Nivel de madure*, es la de Personas o Empleados. La Figura 31. *Personas o Empleados* presenta la evaluación de cada uno de los ítems.

Figura 31. *Personas o Empleados de Industrias Muchitaa S.A.S.*



Fuente: Elaboración propia.

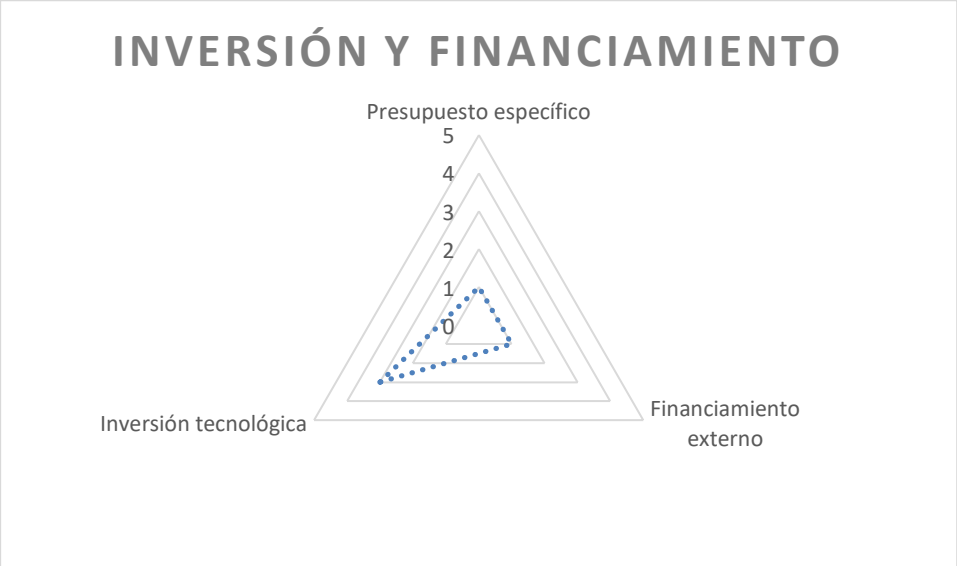
Los tres ítems se ubican en el nivel 1, lo que indica una valoración muy baja. La dimensión obtiene un valor promedio 1.0 correspondiente al Nivel inicial.

La empresa muestra ausencia de planes estructurados de capacitación, lo cual limita la actualización de conocimientos en nuevas tecnologías. Además de una falta de formación en competencias digitales básicas (TIC), lo que representa una barrera para la adopción de herramientas de la Industria 4.0. Además, la cultura de innovación incipiente refleja resistencia al cambio y una escasa participación en procesos de mejora.

Por lo cual se recomienda, diseñar e implementar un plan básico de formación interna, priorizando habilidades digitales esenciales como manejo de software, datos, automatización básica. El vincular al personal a procesos de mejora, promoviendo la innovación desde el conocimiento del proceso. Se sugiere realizar convenios con instituciones de formación técnica o universitaria para cursos o diplomados enfocados en soluciones de Industria 4.0 para PYMES.

La baja preparación del talento humano en competencias digitales y la falta de una cultura organizacional orientada a la innovación evidencian la necesidad de fortalecer el capital humano como pilar el proceso de transformación digital. Sin embargo, la implementación de estrategias de formación y mejora continua también depende de la disponibilidad de recursos económicos y capacidad de inversión tecnológica. En ese sentido, la siguiente dimensión evaluada, Inversión y Financiamiento, permite analizar hasta qué punto la empresa cuenta con los medios financieros para respaldar la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 y sostener procesos de mejora en el tiempo.

Figura 32. *Inversión y Financiamiento de Industrias Muchitaa S.A.S.*



Fuente: Elaboración propia.

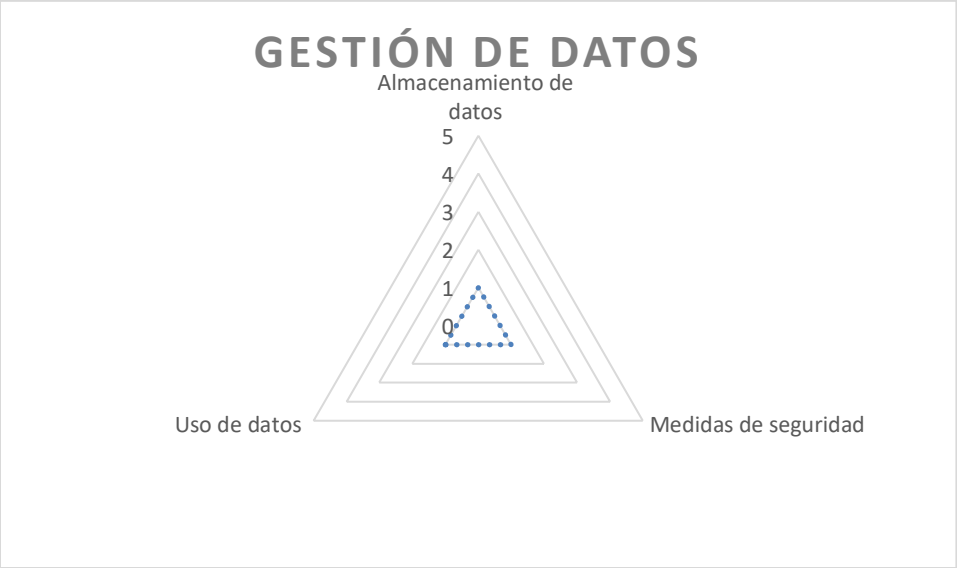
El valor general de esta dimensión es 1,6 lo cual corresponde al Nivel 1: Inicial, aunque muy próximo a avanzar al nivel básico. Se observa en la Figura 32. *Inversión y Financiamiento* una leve inclinación a la existencia de inversión en términos de tecnología que permita mejorar operaciones en la producción, esto permite afirmar que la empresa ha considerado destinar recursos económicos, aunque probablemente aún no estén enfocados en tecnología avanzada.

Se determina gracias a la evaluación en esta dimensión que existe un bajo rendimiento en el nivel de inversión tecnológica dado que la empresa no cuenta con un plan de inversión en tecnología digital o herramientas de Industria 4.0. Además, no se evidenció gestión de recursos ante programas gubernamentales, convocatorias o alianzas estratégicas.

Se recomienda establecer un plan de inversión gradual en herramientas digitales, priorizando aquellas con bajo costo y alto impacto en la eficiencia operativa, como sensores básicos, sistemas de control de inventario o software de gestión administrativa. Asimismo, es fundamental explorar y acceder a fuentes de financiamiento externo, tales como fondos de innovación, líneas de crédito con condiciones preferenciales para PYMES, o programas de apoyo institucional ofrecidos por entidades como la Cámara de Comercio, el SENA o MinCiencias.

No obstante, la sostenibilidad de estas inversiones tecnológicas requiere una adecuada gestión de los datos que generan. En consecuencia, la siguiente dimensión evaluada, Gestión de Datos y Ciberseguridad, analiza la capacidad de la empresa para capturar, almacenar, analizar y proteger la información, la cual es un activo estratégico en entornos digitales.

Figura 33. *Gestión de datos de Industrias Muchitaa S.A.S.*



Fuente: Elaboración propia.

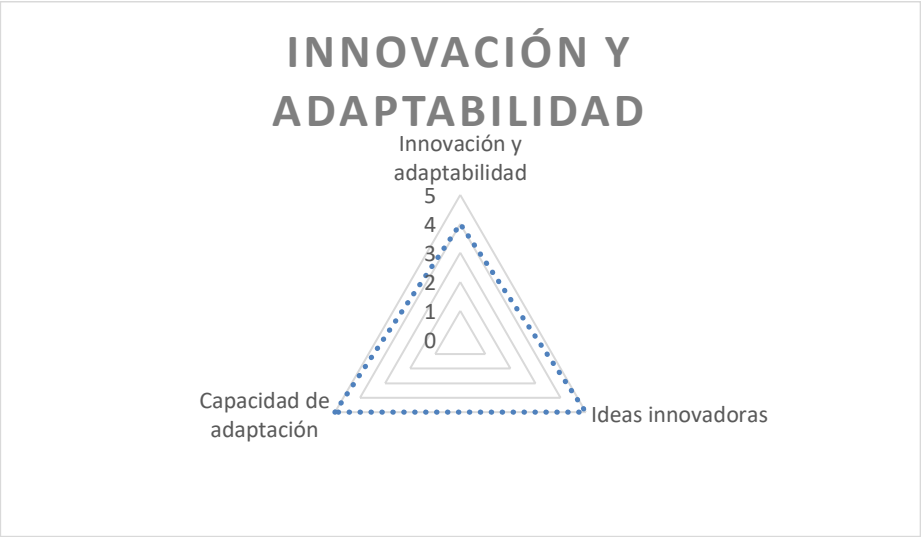
En la empresa no existe almacenamiento de procesos u operaciones, se usa papel o archivos simples en hojas de cálculo sin organización clara. No hay evidencias de sistemas que permitan analizar o visualizar información para mejorar los procesos. Además no se identifican protocolos de respaldo, antivirus, acceso seguro a la información ni políticas de protección de datos.

Se recomienda a la empresa implementar herramientas básicas para la gestión de datos, como hojas de cálculo estructuradas por categorías o software de inventario que permita realizar respaldos automáticos. Asimismo, es fundamental capacitar al personal en prácticas elementales de protección de la información y uso estratégico de los datos, especialmente para apoyar la toma de decisiones operativas, como el monitoreo de la producción o la trazabilidad de materias primas. También se sugiere el diseño de un protocolo sencillo de ciberseguridad que contemple medidas como la realización de respaldos periódicos, el control de acceso a los archivos y el uso de contraseñas seguras. Finalmente se podría evaluarse la adopción de soluciones en la nube de bajo costo, las cuales facilitarían una mejor disponibilidad, gestión y seguridad de la información crítica para la empresa.

Una gestión de datos adecuada no solo fortalece la toma decisiones informadas, sino que también crea las condiciones necesarias para impulsar procesos de innovación sostenida. Disponer de información confiable y accesible permite a las organizaciones identificar oportunidades de mejora, responder con mayor agilidad a los cambios del entorno y fomentar una cultura de aprendizaje continuo. En este sentido, la dimensión de Innovación y Adaptabilidad, cobra especial relevancia, ya que refleja la capacidad de la empresa para

transformar sus ideas en soluciones prácticas, así como su disposición para evolucionar frente a los desafíos del mercado y del entorno tecnológico.

Figura 34. *Innovación y Adaptabilidad de Industrias Muchitaa S.A.S.*



Fuente: Elaboración propia.

La dimensión Innovación y Adaptabilidad obtuvo un puntaje de 4,6, ubicándose en el Nivel 4: Avanzado, lo cual refleja una alta madurez en esta área. Los resultados indican que la empresa presenta una actitud proactiva frente a la mejora continua, con una notable capacidad para adaptarse a los cambios del entorno y generar ideas innovadoras desde sus propios procesos.

Esta disposición a la innovación se convierte en una fortaleza estratégica que puede ser aprovechada como motor para impulsar el desarrollo de las demás dimensiones del modelo de madurez. A pesar de las limitaciones tecnológicas actuales, la apertura de la empresa a explorar nuevas formas de hacer las cosas, mejorar productos o incorporar soluciones desde su conocimiento práctico, sienta las bases para avanzar hacia una transformación digital progresiva.

No obstante, este potencial aún debe traducirse en mecanismos formales y sostenibles que consoliden la innovación como parte de la cultura organizacional. La empresa puede fortalecer este enfoque estableciendo espacios estructurados para la generación de ideas, promoviendo el trabajo colaborativo y vinculándose con redes de innovación, tanto locales como nacionales.

La empresa demuestra una alta adaptabilidad organizacional y una predisposición positiva hacia el cambio, aspectos fundamentales para asumir procesos de transformación digital. Este nivel de madurez puede convertirse en un eje articulador del plan estratégico, aprovechando esta fortaleza para abordar las brechas detectadas en dimensiones como digitalización, gestión de datos y formación de personal.

Se recomienda la formalización de mecanismos internos de innovación, tales como espacios colaborativos para la generación de ideas, círculos de mejora o comités de innovación. Asimismo, se sugiere establecer alianzas con universidades, centros de investigación y programas gubernamentales que fomenten la transferencia tecnológica y el desarrollo de capacidades innovadoras. Es fundamental que esta disposición al cambio se articule con objetivos estratégicos concretos, de modo que las ideas generadas se traduzcan en proyectos factibles, alineados con las necesidades operativas y tecnológicas de la empresa. Finalmente, se recomienda documentar y sistematizar las experiencias innovadoras para facilitar su réplica, evaluación y mejora continua.

4.4.2 Validación en Lácteos Fresco

Se aplicó presencialmente el cuestionario (ver Anexo D). El instrumento fue aplicado durante una visita a las instalaciones de la empresa. La persona entrevistada fue la ingeniera agroindustrial Dayra Quenan, encargada del área de control de calidad. En el momento de la visita, la ingeniera también asumía la supervisión general de los procesos, dado que la profesional responsable de la producción se encontraba en periodo de vacaciones.

La entrevista se realizó en un ambiente colaborativo y con la debida autorización, siguiendo el formato de preguntas establecido en el diseño del modelo. La ingeniera respondió de manera reflexiva cada uno de los 21 ítems distribuidos en las siete dimensiones evaluadas, en función de su conocimiento operativo y estratégico del funcionamiento de la planta.

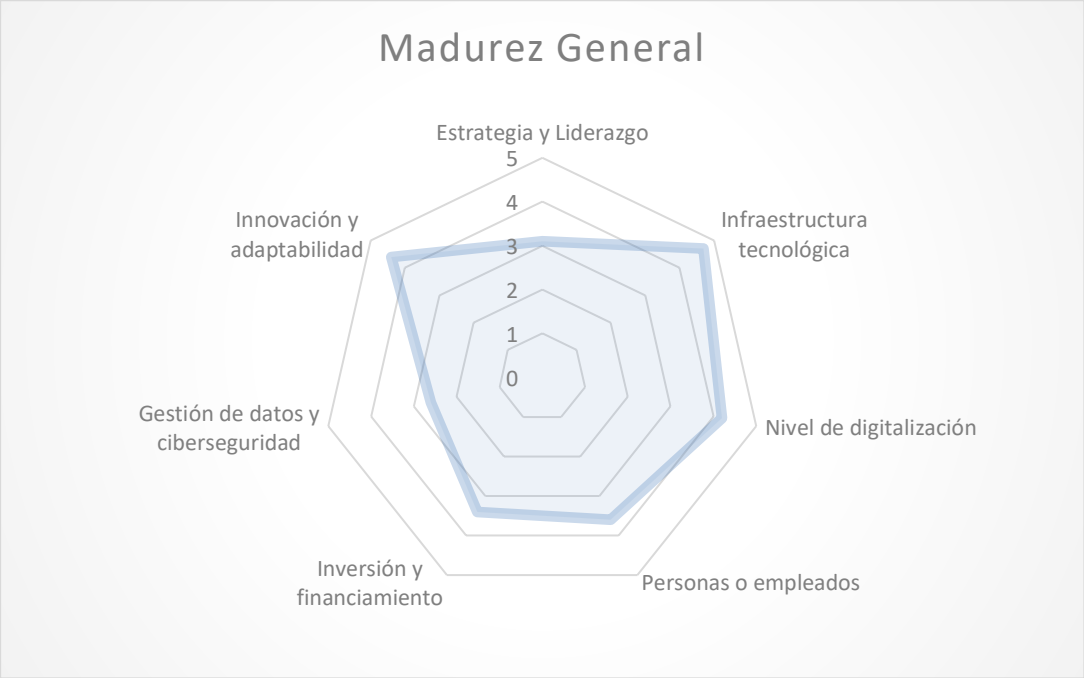
Las respuestas fueron registradas en una hoja de cálculo y posteriormente se procedió a realizar el cálculo del nivel de madurez por dimensión utilizando la fórmula (1) definida en el capítulo 3. Este procedimiento permitió obtener un puntaje ponderado por dimensión, que luego fue interpretado a partir de los rangos establecidos en el semáforo de madurez del modelo.

En la Figura 35. *Madurez General de Lácteos Fresco* se presenta una representación gráfica tipo radar del nivel de madurez digital de la empresa Lácteos Fresco, de acuerdo con los resultados obtenidos en la aplicación del instrumento. Esta visualización permite identificar de forma clara los aspectos en los que la empresa muestra mayor desarrollo, así como aquellos que requieren fortalecimiento.

- ***Resultados del Modelo de Madurez***

Luego de la aplicación del instrumento y el procesamiento de los datos recolectados en Lácteos Fresco, se obtuvieron los niveles de madurez por cada una de las dimensiones evaluadas. Estos niveles se calcularon utilizando la fórmula (1), integrando las calificaciones otorgadas por las personas entrevistadas y los pesos previamente establecidos para cada ítem.

Figura 35. *Madurez General de Lácteos Fresco*



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, las dimensiones con mayores niveles de madurez son infraestructura tecnológica e innovación y adaptabilidad, mientras que Gestión de datos y ciberseguridad se encuentra en un nivel más bajo, indicando una prioridad de intervención.

A continuación se presenta la Tabla 30. *Nivel de Madurez*, que resume los resultados de madurez por dimensión, junto con la clasificación correspondiente según los niveles establecidos:

Tabla 30. *Nivel de Madurez de Lácteos Fresco*

Dimensión	Puntaje Obtenido	Nivel de Madurez
Estrategia y Liderazgo	3.1	Intermedio
Infraestructura Tecnológica	4.7	Avanzado
Nivel de digitalización de procesos	4.2	Avanzado
Personas o empleados	3.6	Intermedio
Inversión y financiamiento	3.4	Intermedio
Gestión de datos y ciberseguridad	2.6	Básico
Innovación y adaptabilidad	4.4	Avanzado

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos resultados, se evidencia que la empresa presenta un desempeño avanzado en tres dimensiones clave: infraestructura tecnológica, digitalización de procesos e innovación, lo cual refleja un nivel de preparación significativo para adoptar herramientas de la industria 4.0.

Por otro lado, la dimensión de gestión de datos y ciberseguridad se ubica en un nivel básico, lo cual representa un área crítica de mejora, especialmente si se considera la importancia de los datos en los entornos digitales actuales. Asimismo, aspectos como estrategia y liderazgo, así como la inversión, se sitúan en un nivel intermedio, lo que sugiere que si bien existen esfuerzos en curso, aún hay espacio para consolidar una visión estratégica digital de largo plazo.

Además, del análisis por dimensión, se realizó un estudio desagregado por ítem, lo que permitió identificar fortalezas y debilidades específicas dentro de cada área evaluada. Esto se explora con mayor detalle a continuación.

Según la **Figura 36.** Estrategia y Liderazgo Lácteos Fresco existe una disposición clara por parte de la dirección hacia la transformación digital, lo que es una fortaleza estratégica. Sin embargo, no hay una visión plenamente consolidada ni una estrategia formalizada, lo que limita el impacto del liderazgo. La **Figura 36.** Estrategia y Liderazgo Lácteos Fresco, muestra que existe una visión digital alineada con los objetivos a nivel alto, en cambio no hay una hoja de ruta que permita que estos esfuerzos se realicen de manera organizada.

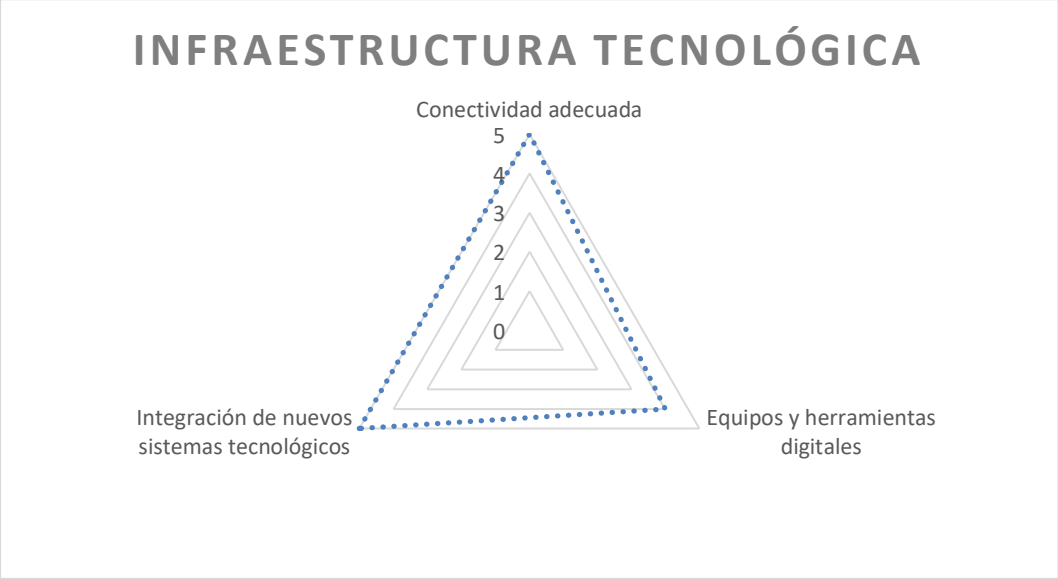
Figura 36. Estrategia y Liderazgo Lácteos Fresco

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la dimensión *Infraestructura tecnológica,* **Figura 37.** *Infraestructura tecnológica de Lácteos Fresco*, presenta una alta conectividad, es decir, la empresa cuenta con conexión a Internet de Banda Ancha y existe una integración de las tecnologías básicas dentro de las operaciones de la empresa como tal. Se podría decir entonces que la empresa cuenta con una infraestructura adecuada en cuanto a equipos y conectividad. Sin embargo, esta infraestructura no está vinculada a sistemas de automatización ni a tecnologías de Industria 4.0 como IoT o Big Data.

Se recomienda que la empresa construya un plan donde avance hacia las tecnologías más avanzadas mediante una inversión gradual en sensores, redes de datos y dispositivos interconectados.

Figura 37. *Infraestructura tecnológica de Lácteos Fresco*

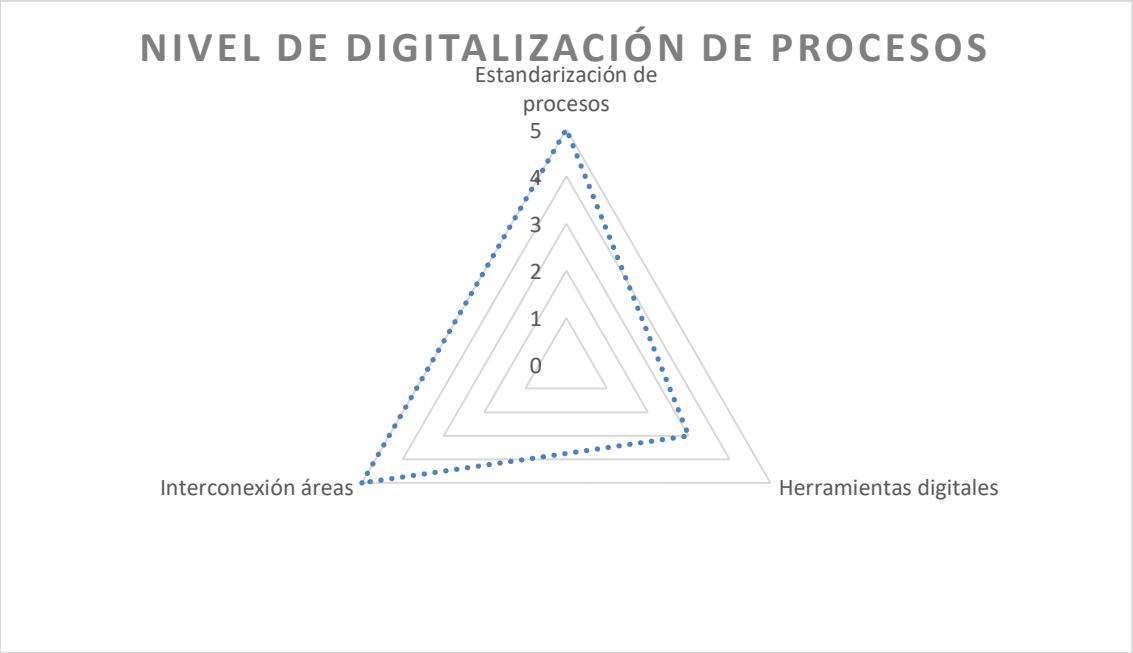


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38. *Nivel de digitalización de procesos en Lácteos Fresco.*, se muestra una alta estandarización de procesos, así como un buen uso de herramientas digitales en operaciones clave. La dimensión *Nivel de digitalización de Procesos,* es una de las dimensiones más fuertes ya que existen procesos claramente definidos, con procesos estandarizados y documentación digitalizada acerca de dichos procesos, cuentan con maquinarias semi automáticas que ayudan a realizar las operaciones de manera más rápida y concreta. Sin embargo, sus áreas no tienen una interconexión adecuada y sus controles se hacen de manera manual aún.

Por lo tanto, se recomienda la implementación de sistemas integrados como el ERP (Planificación de Recursos Empresariales) para controlar la producción de manera que no se pierdan datos por el mal uso de los formatos que deben llenar los operarios de las diferentes estaciones de trabajo.

Figura 38. *Nivel de digitalización de procesos en Lácteos Fresco.*

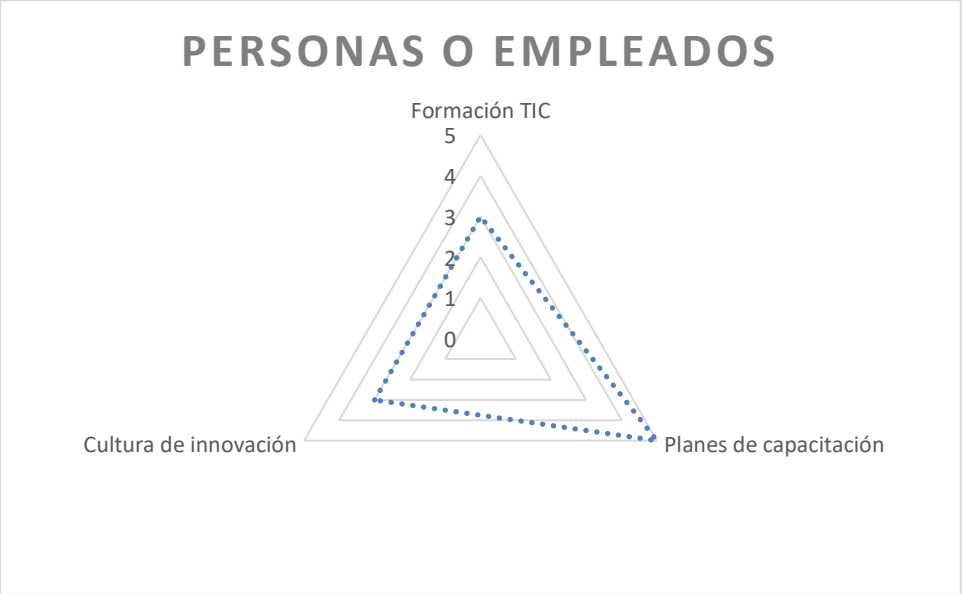


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 39. *Personas o empleados de Lácteos Fresco*, se muestra la dimensión *Personas o Empleados,* donde se muestra una cultura de innovación moderada, donde existen planes de capacitación para el manejo de la maquinaria y las nuevas innovaciones que se han desarrollado dentro de la empresa, por lo que se puede afirmar, que el personal tiene una buena disposición al cambio y a la mejora, aunque no cuenta con procesos formales de capacitación continua ni desarrollo de competencias digitales.

Por lo tanto, se recomienda implementar un programa de formación en Industria 4.0 enfocado en tecnologías, datos y metodologías digitales.

Figura 39. *Personas o empleados de Lácteos Fresco*



Fuente: Elaboración propia.

Para la dimensión *Inversión y Financiamiento* se destaca la Figura 40. *Inversión y financiamiento de Lácteos Fresco* donde se mira que la inversión de la empresa es razonable y se cuenta con un porcentaje bajo de fuentes de financiamiento externo.

La empresa muestra un esfuerzo por invertir con sus propios recursos pero carece de mecanismos para apalancar su crecimiento a través de créditos o fondos públicos. Por lo cual se recomienda buscar programas de fomento del gobierno, convocatorias o alianzas para cofinanciar procesos de transformación digital.

Figura 40. *Inversión y financiamiento de Lácteos Fresco*

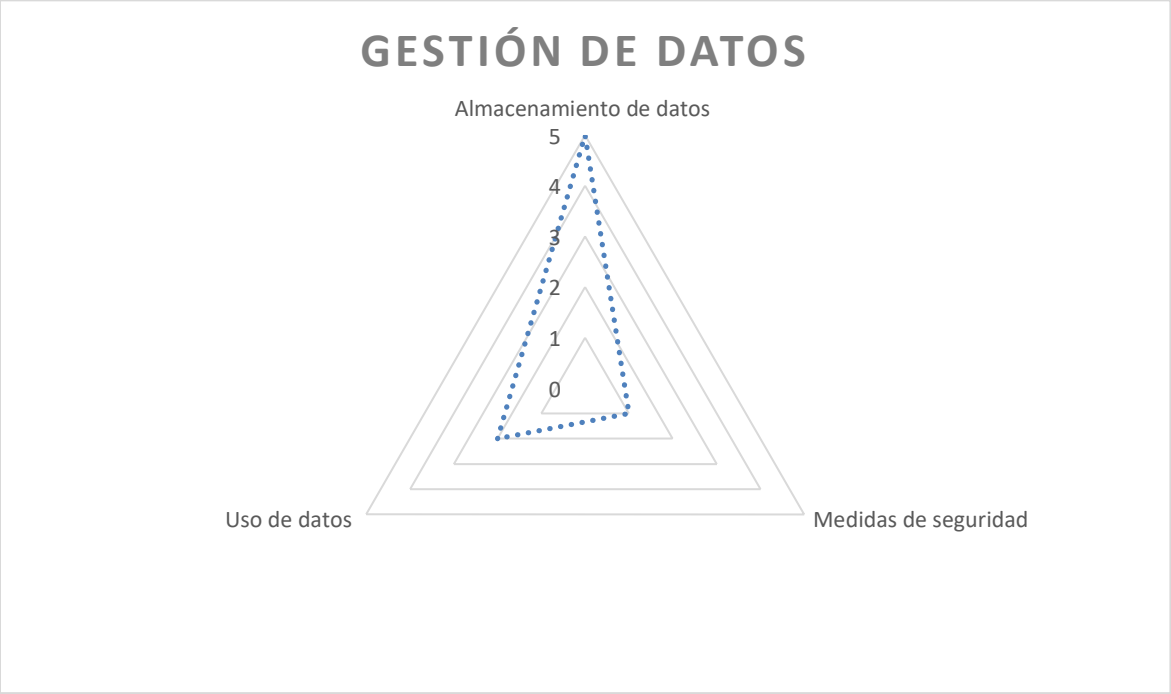
Fuente: Elaboración propia.

En la dimensión *Gestión de datos y Ciberseguridad,* se destaca el bajo uso de los datos para la toma de decisiones estratégicas, y una escasa implementación de medidas de seguridad de información importante dentro de la web.

Esta es una de las áreas más críticas. El manejo de datos es limitado y no existe una estrategia clara de protección, análisis o visualización.

Por lo tanto, se recomienda implementar un sistema básico de recopilación y análisis de datos. Establecer protocolos de ciberseguridad adaptados a las capacidades actuales.

Figura 41. *Gestión de datos y ciberseguridad de Lácteos Fresco.*



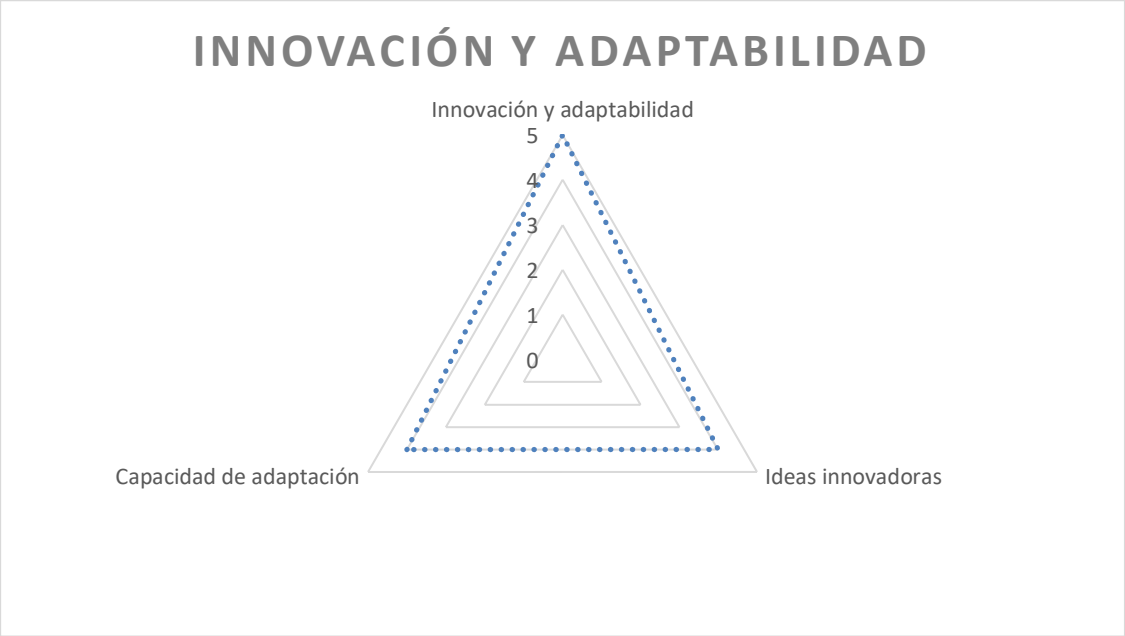
Fuente: Elaboración propia.

Por último la dimensión *Innovación y Adatabilidad* presenta a través de la Figura 11X una alta capacidad de adaptación, así como buenas prácticas en la generación de ideas.

La organización se adapta rápidamente a los cambios, lo que puede facilitar la implementación de innovaciones tecnológicas. Sin embargo, muchas de estas ideas no se sistematizan ni se traducen en procesos concretos.

Se recomienda en esta dimensión, fortalecer los procesos de innovación formal, con etapas definidas, responsables y conexión con objetivos estratégicos.

Figura 42. Innovación y adaptabilidad de Lácteos Fresco.



Fuente: Elaboración propia.

4.5 Plan estratégico

En esta sección se pretende a través de los hallazgos proporcionados por el modelo de validez realizar un plan estratégico que permita a las empresas conocer sus debilidades y como superar las barreras establecidas y poder así estar 100% preparadas para la transformación digital por lo cuál esto es un valor agregado que se deriva del Modelo de Madurez.

4.5.1 Plan estratégico de Transformación digital para Industrias Muchitaa S.A.S.

El plan estratégico para Industrias Muchitaa S.A.S. responde a las brechas detectadas por el modelo de madurez en dimensiones clave como digitalización de procesos, formación del personal gestión de datos y financiamiento. En primer lugar, se recomienda fortalecer la visión y el liderazgo digital mediante talleres de planeación estratégica enfocados en la transformación digital, articulando esta visión con los objetivos del negocio y asignando un responsable interno para su implementación.

En cuanto a la infraestructura tecnológica, aunque se cuenta con maquinaria semiautomatizada, es clave avanzar hacia la adopción de herramientas con sensores y mejorar la conectividad digital básica. Se recomienda una inversión progresiva iniciando con soluciones de bajo costo y alto impacto, como software de gestión gratuito herramientas en la nube.

Respecto al nivel de digitalización, se identificó una ausencia casi total de herramientas digitales. Por ellos, es prioritario digitalizar los procesos clave del ciclo productivo, iniciar con hojas de cálculo organizadas, trazabilidad manual mejorada y automatización progresiva de procesos críticos como control de calidad e inventarios.

En el ámbito del talento humano, se evidenció falta de formación en competencias TIC. Se propone implementar un plan de capacitación básica en tecnologías digitales, fomentar una cultura de innovación interna e incentivar la participación del personal en mejoras. Las alianzas con instituciones técnicas o universitarias pueden ser útiles para ofrecer formación continua en Industrias 4.0.

En inversión y financiamiento, la empresa muestra debilidad para destinar recursos a tecnología. Se recomienda desarrollar un plan de inversión gradual y gestionar recursos ante convocatorias públicas o entidades como el SENA, MInCiencias o la Cámara de Comercio. En gestión de datos y ciberseguridad, es fundamental implementar registros digitales simples, definir protocolos básicos de seguridad informática y capacitar al equipo sobre buenas prácticas de manejo de datos.

Finalmente, en cuanto a innovación y adaptabilidad, la empresa presenta fortalezas importantes. Se recomienda capitalizar esa cultura innovadora para liderar el proceso de transformación digital formalizar espacios de ideación interna y vincularse a redes de innovación que apoyen la competitividad territorial.

4.5.2 Plan estratégico de Transformación digital para Lácteos Fresco

Lácteos Fresco presenta una situación diferente, con niveles más consolidados en dimensiones como infraestructura tecnológica, digitalización de procesos e innovación. Aun así, el modelo de madurez permite identificar oportunidades estratégicas para continuar escalando su transformación digital.

En primer lugar, en la dimensión de estrategia y liderazgo se recomienda afianzar el liderazgo digital mediante la integración de indicadores de transformación tecnológica en la gestión directiva, y fortalecer la planificación estratégica incorporando metas digitales específicas.

Respecto a la infraestructura tecnológica, se sugiere evaluar la incorporación de sensores IoT y migrar parcialmente hacia tecnologías con conectividad cloud, que faciliten la trazabilidad y el monitoreo automatizado. En la digitalización de procesos, el siguiente paso es automatizar registros de calidad, reportes de inventarios y procesos de trazabilidad por lote.

En formación del talento humano, se recomienda ampliar la capacitación del equipo en analítica de datos, IoT y otras competencias propias de la Industria 4.0, así como identificar líderes internos que puedan fungir como promotores de la transformación.

En cuanto a financiamiento, es fundamental diversificar las fuentes mediante alianzas con instituciones académicas, centros de investigación o convocatorias de innovación. Para la gestión de datos y ciberseguridad, se deben implementar soluciones de almacenamiento digital, respaldos automatizados y protocolos de acceso seguro a la información.

Finalmente, en innovación y adaptabilidad, Lácteos Fresco ya muestra fortalezas destacadas. El plan estratégico debe reforzar esta capacidad mediante vigilancia tecnológica, participación en ferias y espacios de innovación, así como el desarrollo de nuevos productos con valor agregado.

Este plan puede ajustarse periódicamente en función de los avances, las oportunidades del entorno y la retroalimentación que se genere tras su implementación.

5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

- Se logró diseñar un modelo de madurez específico para evaluar la preparación y adopción de tecnologías de Manufactura Digital en las PYMES del sector agroalimentario del municipio de Aldana, Nariño. Este modelo integra dimensiones claves identificadas tanto en la literatura académica como en el diagnóstico del contexto local, lo que le otorga pertinencia, aplicabilidad y adaptabilidad a las condiciones reales del entorno regional.
- El modelo se estructuró en torno a siete dimensiones fundamentales: Estrategia y liderazgo, Infraestructura tecnológica, Nivel de digitalización de procesos, Personas o empleados, Inversión y financiamiento, Gestión de datos y ciberseguridad, e Innovación y adaptabilidad. Cada dimensión fue definida con claridad conceptual, respaldada por indicadores específicos y organizada en cuatro niveles de madurez, lo que permite una evaluación progresiva y comprensible por parte de las PYMES.
- La caracterización de las PYMES agroalimentarias del departamento de Nariño permitió construir el concepto de “empresa tipo”, que actuó como puente metodológico entre teoría y práctica. Esta caracterización aportó insumos clave para adaptar el modelo de madurez a la realidad operativa, tecnológica y organizacional del territorio, garantizando que los indicadores fueran realistas, comprensibles y accionables.
- La validación del modelo se llevó a cabo en dos PYMES reales del municipio de Aldana, mediante la aplicación del instrumento a personas responsables de los procesos operativos. Los resultados evidencian diferencias importantes entre las empresas evaluadas, lo que demuestra la capacidad del modelo para discriminar entre niveles de madurez y proporcionar una fotografía diagnóstica precisa y útil para la toma de decisiones.
- Se constató que las PYMES evaluadas presentan fortalezas en dimensiones como la innovación y adaptabilidad o el liderazgo operativo, pero también debilidades notorias en áreas como gestión de datos, infraestructura tecnológica y formación

del talento humano. En general, el nivel de madurez digital se ubica entre los niveles "Inicial" y "Básico", lo que evidencia un amplio margen de mejora.

- A partir de los resultados del modelo, se diseñaron planes estratégicos específicos para cada empresa evaluada, lo que representa un valor agregado de la tesis. Estos planes incluyen acciones prioritarias, recomendaciones por dimensión, y una hoja de ruta que orienta a las empresas en su transición hacia la Industria 4.0 de manera progresiva, viable y contextualizada.
- Esta tesis no solo aporta un marco conceptual sólido y un modelo de evaluación novedoso para el sector agroalimentario de Nariño, sino que también entrega herramientas prácticas que pueden ser replicadas por otras instituciones, investigadores o entidades públicas interesadas en promover la transformación digital de las PYMES rurales en Colombia.

5.2 Recomendaciones

Como resultado del proceso de diseño, validación y aplicación del modelo de madurez para evaluar la preparación digital de las PYMES manufactureras en el municipio de Aldana, se recomienda utilizar el modelo no solo como una herramienta diagnóstica, sino como un instrumento estratégico de planificación. Su estructura flexible y contextualizada permite adaptarlo a distintas realidades organizativas, especialmente en regiones rurales con condiciones tecnológicas limitadas. Es recomendable que las empresas lo apliquen de forma periódica, como parte de sus procesos de mejora continua, lo cual permitirá medir avances, priorizar inversiones y fortalecer áreas críticas. A nivel institucional, se sugiere que el modelo sea considerado como una base para programas de acompañamiento técnico, formación y financiación específica para PYMES en transición hacia la Manufactura Digital. Por otra parte, se evidenciaron limitaciones metodológicas asociadas a la disponibilidad de información, la resistencia al cambio y el nivel de comprensión tecnológica de algunos actores entrevistados, por lo que se recomienda complementar la aplicación del instrumento con espacios de sensibilización y formación básica. Asimismo, sería conveniente ajustar las preguntas del cuestionario para evaluar de manera más específica los impactos de la tecnología en la operación de la empresa como tal y su competitividad en términos de operación y que esto se vea reflejado en la generación de nuevo empleo. Además no se consideraron variables como lo difícil que es sobrevivir dentro del mercado, esto no se consideró en la realización del modelo de madurez. Finalmente se sugiere, continuar con el perfeccionamiento del modelo mediante su aplicación en otros sectores o municipios del departamento, lo cual contribuiría a robustecer su validez empírica, ampliar su aplicabilidad regional y consolidar una base de conocimientos útil para la formación de políticas públicas y estrategias de transformación digital en territorios con condiciones similares.

A. Anexo: Valoración de artículos

ID	Autor	C1	C2	C3	C4	TOTAL	PRINCIPAL APORTE
1	(Dossou et al., 2022b)	1	1	1	1	**4.0**	Aplica una metodología sostenible para la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES, con el propósito de mejorar su eficiencia y sostenibilidad.
2	(Brodeur et al., 2023)	1	0.5	0.5	0	**2.0**	El documento investiga las características y la dinámica de los cambios organizativos necesarios para gestionar la transformación de la Industria 4.0 en las PYMES manufactureras y propone un enfoque iterativo para gestionar estos camibos.
3	(Amaral & Peças, 2021b)	1	0.5	0.5	1	**3.0**	El artículo plantea la digitalización de las PYMES mediante una metodología fundamentada en los modelos de madurez empresarial
4	(Brodeur et al., 2022)	1	1	0.5	1	**3.5**	Plantean la formulación de acciones para la implementación de tecnologías, considerando los factores críticos de éxito en las PYMES.
5	(Busto Parra et al., 2022)	1	0.5	1	1	**3.5**	Integran las tecnologías ERP y la filosofía LEAN para optimizar la eficiencia de los procesos empresariales y aumentar el valor agregado en sus productos. El estudio de caso presentado ilustra esta integración a través de su metodología.
6	(Khin & Hung Kee, 2022)	1	1	0	1	**3.0**	Este estudio elabora y pone a prueba de manera empírica un modelo de investigación enfocado en las PYMES, con el objetivo de conceptualizar los factores vinculados a la preparación para la Industria 4.0
7	(Gamache et al., 2020)	1	1	0.5	1	**3.5**	Introducen un modelo específico para evaluar el nivel de adopción de tecnologías digitales en las empresas, lo que proporciona una sólida estructura para medir su transformación digital. Además, a través de pruebas de hipótesis y análisis estadísticos, identifican las prácticas comerciales y tecnológicas

							de la Industria 4.0 que tienen un mayor impacto en el éxito de las PYMES manufactureras.
8	(Ricci et al., 2021)	0	0	0.5	0	**0.5**	Proponen un marco teórico que explora el papel de las fuentes de conocimiento externo en el proceso de reconocimiento de oportunidades. Esto significa que, cuando las PYMES comprenden y evalúan los beneficios de las tecnologías de la Industria 4.0, adquieren conocimientos sobre cómo implementar estas nuevas tecnologías en sus operaciones.
9	(Amaral & Peças, 2021a)	0.5	0.5	1	0.5	**2.5**	Presentan un modelo integral de madurez para la Industria 4.0 que está diseñado específicamente para las PYMES. Este modelo tiene el propósito de ayudar a estas empresas a aprovechar al máximo los beneficios del cambio de paradigma.
10	(Chavez et al., 2022)	0	0	1	0.5	**1.5**	Presentan el estado de la investigación en el área de gestión de desvíos, comprendiendo la situación actual de la investigación identificando brechas y debilidades existentes.
11	(Dutta et al., 2020)	0.5	0	1	0	**1.5**	El estudio se basa en una revisión de la literatura relevante, destinada a examinar los artículos académicos publicados hasta finales de septiembre del 2018, seguido de una encuesta de evaluación de madurez de las PYMES, para establecer las áreas prioritarias de implementación de tecnologías de I4.0
12	(Han & Trimi, 2022)	0.5	0.5	1	1	**3.0**	El artículo propone una hoja de ruta para la aplicación de las tecnologías de la I4.0 y mejorar las capacidades de las PYMES, además de una estructura para la estandarización I4.0 para desarrollar y mantener la confianza entre los socios.
13	(Battistoni et al., 2023)	1	0.5	0.5	1	**3.0**	Proporcionan un análisis de las rutas de implementación adoptadas por las PYMES a través de un modelamiento matemático realizado a datos de una encuesta realizada a diferentes PYMES italianas
14	(Naeem & Garengo, 2022)	0.5	0	0.5	0.5	**1.5**	Proponen un modelo de madurez orientado a las PYMES con el fin de explorar la interacción entre los procesos de fabricación, el sistema de medición del rendimiento y las prácticas de gestión.
15	(Marrucci et al., 2023)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo se enfoca en cómo factores tecnológicos, organizativos y ambientales se interrelacionan para dar forma al grado de implementación de estas tecnologías en las PYMES. Se resalta la importancia de la

							infraestructura tecnológica sólida, las capacidades técnicas específicas de la I4.0 y la habilidad para integrar estas tecnologías en los procesos existentes de la organización.
16	(Wong & Kee, 2022)	1	0.5	1	1	**3.5**	Los autores desarrollaron una metodología basados en la Teoría de la Vista Basada en Recursos y determinaron una metodología que los factores impulsadores de la preparación de las PYMES para la I4.0 son: las capacidades organizacionales, apoyos institucionales de las PYMES, la ventaja percibida y los factores del mercado; de los cuales el apoyo institucional, la capacidad organizativa y los factores del mercado se correlacionan positivamente entre ellos.
17	(Bär et al., 2018)	1	0.5	1	1	**3.5**	El artículo aborda la influencia de las tecnologías de la Industria 4.0 en la cadena de suministro de las PYMES, especialmente enfocado en mejorar la experiencia del cliente. Los aportes principales incluyen la propuesta de un marco de trabajo de cinco pasos para la realización de la Industria 4.0 compuesto por ocho factores clave que ayudan a determinar el estado actual de una organización hacia la obtención de beneficios de la industria 4-0 en la cadena de suministro. El artículo destaca cómo estas tecnologías tienen el potencial de mejorar significativamente los procesos de la cadena de suministro en las PYMES, brindando ventajas competitivas y resaltando la importancia de la alineación estratégica, el análisis de costos y beneficios, y la adaptación de los enfoques de implementación para lograr una transición exitosa hacia la Industria 4.0.
18	(Müller et al., 2018)	1	1	1	1	**4.0**	El estudio proporciona una comprensión en profundidad de como tres dimensiones clave de la Industria 4.0 (digitalización de procesos, fabricación inteligente y conectividad empresarial) afectan los elementos de creación de valor, captura de valor y oferta de valor en los modelos de negocio de las PYMES. Además el artículo identifica categorías de PYMES basadas en su enfoque hacia la Industria 4.0 y presenta ejemplos específicos de innovación en cada uno de los elementos del modelo de negocio.

19	(Mittal, Khan, et al., 2018)	1	0.5	0.5	1	**3.0**	El artículo identifica brechas en los modelos de madurez actuales que no abordan completamente los requisitos y desafíos de las PYMES. Además, propone la idea de un "nivel 0" en los modelos de madurez para reflejar el punto de partida realista de muchas PYMES en su adopción de tecnologías de Industria 4.0. Este enfoque contribuye al desarrollo futuro de modelos de madurez más adaptados a las realidades de las PYMES, lo que puede facilitar su transición hacia la Industria 4.0 de manera más efectiva y reducir los riesgos asociados.
20	(Moeuf et al., 2018)	1	0.5	1	1	**3.5**	El estudio realizó una revisión exhaustiva de la investigación aplicada existente sobre los cambios que la Industria 4.0 está trayendo a las funciones de planificación y control de la producción en las PYMES. El artículo revela que, si bien existe un creciente número de tecnologías y herramientas relacionadas con la Industria 4.0, muchas de ellas no son explotadas en su totalidad por las PYMES. A pesar de que las tecnologías menos costosas y revolucionarias se utilicen más, las que permiten transformaciones empresariales profundas todavía son subutilizadas.
21	(Dutta et al., 2021)	1	1	1	1	**4.0**	Formulación de un enfoque metodológico en tres pasos para abordar la digitalización de los procesos de control de calidad en las PYMES en el contexto de la adopción de la Industria 4.0. Este enfoque aborda la adaptación de los procesos de control de calidad a entornos digitalizados, priorizando las áreas de mejora y proponiendo enfoques específicos para integrar la calidad digital en la cadena de valor.
22	(Selicati & Cardinale, 2021)	0.5	1	0.5	1	**3.0**	Proporciona un enfoque innovador para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en los procesos de fabricación, alineando la digitalización con la optimización de recursos y la toma de decisiones informada.
23	(Masood & Sonntag, 2020)	1	1	1	1	**4.0**	Proporciona una comprensión detallada de los desafíos y beneficios de la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 en las PYMES. Identifica factores clave que afectan la adopción y como influyen en los beneficios y desafíos.
24	(Konur et al., 2021)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo presenta el diseño y desarrollo de un sistema de control de producción inteligente que utiliza

							tecnologías de la Industria 4.0. Además proporciona información sobre los desafíos de implementación de la I4.0 en las PYMES y ofrece una arquitectura de referencia que puede ser aplicada en industrias similares.
25	(Cimini et al., 2021)	1	0.5	0.5	1	**3.0**	Proporciona evidencia empírica sobre cómo las tecnologías de la Industria 4.0 impactan en el desarrollo organizativo de las PYMES, identificando relaciones entre la adopción tecnológica, las competencias y la estructura organizativa. También formula proposiciones de investigación que contribuyen al entendimiento del desarrollo organizativo y de competencias en la era de la Industria 4.0
26	(Liu et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El principal aporte del artículo es la presentación de la arquitectura y la implementación de la plataforma DIGICOR, una plataforma colaborativa de Industria 4.0 diseñada para habilitar la colaboración entre PYMES en la formación dinámica de cadenas de suministro. La arquitectura propuesta aborda los desafíos de colaboración en el contexto de Industria 4.0 y ofrece una solución abierta y extensible para la creación de equipos colaborativos, planificación y control de producción, logística y gestión de riesgos, así como una conectividad sin problemas con soluciones de automatización y fuentes de datos en tiempo real.
27	(Mehdiyev et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo presenta la propuesta y aplicación de un enfoque basado en aprendizaje profundo para la clasificación y agrupación de partes de producción en el contexto de la fabricación bajo demanda en las PYMES de la Industria 4.0. Esto permite la generación de información procesable para la planificación de la producción, mejorando la eficiencia y toma de decisiones en entornos de producción únicos y altamente personalizados.
28	(Prasad et al., 2020)	1	0.5	0.5	0.5	**2.5**	Propone establecer un "learning factory" basada en el enfoque Industria 4.0 para abordar las necesidades de formación y capacitación de las PYMES en la industria del sector metal y la cerrajería. Esta iniciativa busca mejorar la producción de las PYMES al proporcionarles capacitación en tecnologías modernas y eficientes.

							Sin embargo, la descripción del artículo es bastante limitada y no se detalla cómo se logrará está implementación ni como se abordarán los desafíos específicos de las PYMES.
29	(Simetinger & Basl, 2022)	1	0.5	1	0.5	**3.0**	Introduce y valida un nuevo modelo de madurez específico para la implementación de la Industria 4.0 en las pequeñas y medianas empresas manufactureras. Este modelo, denominado I4MMSME, se enfoca en la transformación organizacional y el desarrollo empresarial en lugar de centrarse exclusivamente en las tecnologías. El estudio piloto realizado con este modelo proporcional información valiosa sobre la evaluación y desarrollo de las PYMES manufactureras en la República Checa en términos de su madurez en la adopción de la Industria 4.0
30	(Essakly et al., 2019)	1	1	1	1	**4.0**	Se presenta un marco de evaluación holística de soluciones de Industria 4.0 para las pequeñas y medianas empresas. Este marco de evaluación aborda múltiples perspectivas y combina medidas de evaluación tecnológicas, económicas, ecológicas y sociales para capturar de manera integral el impacto de las soluciones de Industria 4.0 en las PYMES. El artículo contribuye al campo proporcionando una estructura práctica y sistemática para evaluar las soluciones de Industria 4.0 desde una perspectiva global y aplicable a las necesidades específicas de las PYMES.
31	(Estensoro et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo presenta un marco conceptual y metodológico que utiliza una perspectiva basada en recursos para abordar la implementación de la Industria 4.0 en las pequeñas y medianas empresas (PYMES). Este enfoque proporciona una comprensión más profunda de cómo los recursos se combinan y se utilizan en diferentes etapas de desarrollo hacia la Industria 4.0, lo que contribuye a mantener una ventaja competitiva sostenible.
32	(R. Kumar et al., 2020)	1	1	1	1	**4.0**	Se realiza un análisis exhaustivo categorizado de los desafíos en la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas para lograr operaciones éticas y sostenibles. El artículo identifica quince desafíos críticos que afectan la adopción exitosa de esas tecnologías en las PYMES utiliza el

							enfoque DEMATEL para evaluar su grado de influencia y las interrelaciones entre ellos.
33	(Gamache et al., 2019)	1	1	1	1	**4.0**	Desarrollan un modelo de evaluación de desempeño digital para las PYMES manufactureras en Quebec, que ayuda a identificar los factores clave que influyen en la transición digital y el desempeño en este contexto.
34	(Majstorovic et al., 2020)	1	1	0.5	1	**3.5**	La creación de un modelo de implementación de las herramientas de la Industria 4.0 partiendo desde los sistemas CAD, CAM y ERP. Los cuales toman como base para la monitorización de datos en la nube.
35	(McFarlane et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	Se propone un marco metodológico para guiar el desarrollo y la implementación de soluciones digitales dentro de las operaciones de las PYMES
36	(Sharma et al., 2023)	1	1	1	1	**4.0**	Propone un marco denominado I4-SSCM el cuál identifica las barreras de las PYMES y sus posibles soluciones digitales a través del proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP) y la técnica PROMETHEE para analizar las soluciones digitales.
37	(Schmitt et al., 2020)	0.5	0	1	1	**2.5**	Identificación y evaluación de distintos procedimientos y enfoques para la realización de proyectos de Industria 4.0 en las PYMES.
38	(Peukert et al., 2020)	1	1	1	1	**4.0**	Propone un modelo de proceso para la implementación exitosa y la demostración de casos de uso de la Industria 4.0 en PYMES que operan en redes de producción globales.
39	(Dassisti et al., 2019)	0.5	1	0	1	**2.5**	Propone un enfoque hibrido de análisis exegético y LCA (Análisis Ciclo de Vida) para evaluar la sostenibilidad de los procesos de fabricación. Este enfoque combina dos metodologías para proporcionar una visión más completa de la eficiencia de los procesos de fabricación y al mismo tiempo, establece una estrategia de monitoreo. También sugiere que este enfoque puede contribuir al desarrollo de soluciones de modernización de máquinas.
40	(Peter et al., 2023)	1	1	1	1	**4.0**	Proporciona un enfoque empírico detallado para abordar los desafíos y oportunidades de implementar conceptos de Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas del sector manufacturero de países emergentes. El estudio identifica las perspectivas, obstáculos y requisitos

							clave para la adopción exitosa de la Industria 4.0 en las PYMES
41	(Jayashree et al., 2021)	1	0.5	1	1	**3.5**	El artículo propone un marco conceptual basado en el enfoque Dynamic Capability View (DCV), que analiza cómo los determinantes clave de la implementación de Industria 4.0 en las PYMES manufactureras afectan su capacidad para lograr la sostenibilidad a través de la Triple Bottom Line (TBL). El artículo aborda la falta de investigación empírica sobre la relación entre los determinantes de Industry 4.0 y la sostenibilidad, especialmente en contextos de economías emergentes.
42	(Riedel, 2022)	1	0.5	1	0.5	**3.0**	El artículo propone utilizar el protocolo de comunicación MQTT en combinación con microcontroladores, tecnología de sensores y software de código abierto para monitorear en tiempo real parámetros del proceso.
43	(Baptista & Barata, 2021)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo presenta un enfoque y metodología para la adopción de la industria 4,0 en PYMES utilizando el modelo arquitectónico de Referencia Industrie 4,0 (RAMI 4.0) y técnicas de modelado y arquitectura empresarial, el estudio ayuda a la empresa de estudio a definir su estrategia y a identificar proyectos piloto para la implementación de la Industria 4.0
44	(Grube et al., 2019)	1	0.5	0.5	1	**3.0**	Los autores presentan las Smart Learning Factories como herramientas para ayudar a las PYMES a comprender la I4.0. Esto proporciona una manera práctica y colaborativa de diseñar fabricas utilizando simulación y gemelos digitales, lo que facilita la comprensión de la Industria 4.0 en el contexto de las PYMES y la generación de soluciones innovadoras.
45	(Rauch & Brown, 2020)	0.5	0.5	0.5	1	**2.5**	Proporciona una metodología para desarrollar soluciones de diseño rentables y éticas, aprovechando tecnologías emergentes, especialmente para empresas con recursos limitados.
46	(Traganos et al., 2021)	1	0.5	0.5	1	**3.0**	Presentan el marco de integración HORSE (Hybrid Optimization by Reconfigurable and Self-organized manufacturing systems) que es un marco de referencia arquitectónica que puede facilitar la implementación de tecnologías de la I4.0 en entornos de fabricación tradicionales.
47	(Ramírez-Durán et al., 2021)	1	1	1	1	**4.0**	Se propone una metodología que describe una serie de etapas y actividades bien definidas, fáciles de

							entender y ejecutar con las cuales se puede llevar a cabo, la transición a I4.0 utilizando un mínimo de recursos económicos y aprovechando las nuevas tecnologías poco accesibles en momentos anteriores
48	(Centea et al., 2020)	1	1	0.5	1	**3.5**	Describe cómo una "Learning Factory" (LF) puede ser utilizada en la implementación de conceptos de Industria 4.0 en una PYME, brindando un enfoque práctico y realista para que las PYME adopten estas tecnologías. La colaboración entre LF y la PYME, así como la participación de estudiantes en el proceso de diseño, prototipado y prueba de soluciones, demuestra un modelo efectivo de asociación universidad-industria para capacitar estudiantes y facilitar la adopción de tecnologías avanzadas por parte de las PYMES
49	(Ojha et al., 2023)	0.5	1	0.5	1	**3.0**	El artículo se centra en la integración virtual, que conecta y fusiona las interfaces de la digitalización en las PYME, y explora sus beneficios estratégicos para estas empresas. El artículo se desarrolla a partir de un proceso posterior a la implementación de la Industria 4.0 en las operaciones de la PYME.
50	(Nazim et al., 2022)	0.5	0.5	0.5	1	**2.5**	Reconoce las diversas barreras para la implementación de la Industria 4.0 en las PYME a través de factores críticos de éxito
51	(Shah & Mattiuzza, 2018)	0.5	0.5	1	1	**3.0**	El artículo examina el uso del análisis de estudios de caso sobre la implementación de la fabricación aditiva en PYMES
52	(Ericson et al., 2020)	0.5	1	0.5	1	**3.0**	El artículo problematiza y discute un cambio hacia nuevos modelos de negocio con el fin de resaltar algunos desafíos básicos de la transformación necesaria para la Industria 4.0 por parte de las pequeñas y medianas empresas (PYMES)
53	(Mohammadian et al., 2022)	0.5	0.5	1	0.5	**2.5**	Proporciona un marco de evaluación sistemático que ha permitido la evaluación de la capacidad de las empresas y parques industriales para supervisar los aspectos clave en la implementación de la Industria 4.0.
54	(Trullàs-Ledesma & Ribas-Xirgo, 2009)	0.5	0.5	0.5	0.5	**2.0**	Presenta una metodología para diseñar plantas modulares a través del enfoque multi agente, la metodología se basa en modelar toda la planta como MAS. Luego los diferentes subsistemas se transforman progresivamente en agentes.

55	(Galindo, 2019b)	1	1	1	1	**4.0**	Propone un modelo de madurez digital que se adapta a las características de las PYMES de telecomunicaciones colombianas para que alcancen el proceso de transformación digital, tomando como base los modelos existentes en otras organizaciones y un estudio de caso.
56	(Castañeda Valencia, 2022)	1	1	1	1	**4.0**	Diseñaron una metodología para la integración de la gestión por procesos, las tecnologías de la Industria 4.0 y los principios del Lean Six Sigma en las PYMES manufactureras
57	(Rivillas Mejia, 2022)	0	0	0	0	**0.0**	Propone un modelo de madurez en logística 4.0 para operaciones logísticas de ecommerce, que busca evaluar el nivel de madurez de las organizaciones. Pero la tesis no tiene nada que ver con lo relacionado a la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en PYMES
58	(Stentoft et al., 2021)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo propone analizar y discutir la relación de los impulsores y las barreras de las tecnologías de la Industria 4.0 con la preparación para la industrial 4.0 y la práctica real.
59	(Contreras Pérez et al., 2018)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo se propone obtener los beneficios de aplicar el paradigma de la Industria 4.0 sin incurrir en grandes inversiones y proporcionar herramientas tecnológicas a las pymes que les permitan participar en los mercados globalizados
60	(Azhar et al., 2021)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo realiza un estudio de caso para evaluar los niveles actuales de preparación de las PYMES y examinar la relación de varios factores de cambio, impulso y dimensiones que representan las variables clave para definir el perfil de preparación de la Industria 4.0
61	(Chonsawat & Sopadang, 2020)	1	1	1	1	**4.0**	Definieron indicadores de preparación de las PYMES en el contexto de la Industria 4.0 como herramienta de apoyo para la toma de decisiones y conocer que área de la empresa será la que necesita implementar las herramientas de la Industria 4.0
62	(James & Shetty, 2020)	1	1	1	1	**4.0**	El estudio define un proceso de adopción e implementación de la Industria 4.0 desde la perspectiva del capital humano, teniendo en cuenta tres pasos de integración: 1) crear nuevos puestos de trabajos, 2) reclutar nuevas personas y 3) volver a capacitar y retener el talento.
63	(Marques et al., 2019)	0.5	0	1	0.5	**2.0**	El artículo presenta cómo se puede utilizar un marco de recopilación de datos desarrollado en el marco del

							proyecto C2NET para recopilar datos y respaldar un caso de detección de no conformidades en una Pyme del sector metalúrgica portuguesa.
64	(Powell et al., 2021)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo presenta como proceso de implementación de las herramientas de la Industria 4.0, primero el implementar en toda la empresa la filosofía Lean con el objetivo de que no existan desperdicios y sea mucho más orgánica la transformación digital en la PYME
65	(Rauch et al., 2019)	1	1	1	1	**4.0**	El documento presenta requisitos, barreras y dificultades específicas que se identificaron en talleres con PYME de Europa, EE. UU y Asia. Los requisitos identificados fueron: 1) agilidad en la fabricación y personalización masiva, 2) datos en tiempo real, digitalización y conectividad, 3) tecnologías avanzadas de fabricación y automatización y 4) aprendizaje automático y análisis de datos inteligentes.
66	(Kiran et al., 2023)	0.5	0.5	1	0.5	**2.5**	El artículo estudia cómo se ha desarrollado el tema de la fabricación sostenible a través de la digitalización de procesos a través de un análisis bibliométrico de artículos estudiados entre los años 2012 - 2022 con la herramienta VOSviewer. El artículo no habla sobre la implementación de las herramientas de la Industria 4.0 en las PYME como tal, sino más bien es una visión general de las cosas que suceden en el tema.
67	(Ibrahim et al., 2023)	0	0	1	1	**2.0**	El artículo explora temas como la gobernanza, la gestión de riesgos y el cumplimiento en el contexto de la fábrica inteligente en las PYME manufactureras.
68	(Kanakana-Katumba et al., 2023)	0.5	0	1	1	**2.5**	El artículo propone un marco de arquitectura de datos conceptual que las PYMES pueden utilizar para la recopilación de datos e integrarlos en cualquier tipo de entorno de producción industrial a pequeña escala para permitir una toma de decisiones eficaz. El artículo no propone como se implementaría estas mejoran dentro del funcionamiento como tal de la PYME
69	(Cotrino et al., 2020)	0.5	0	1	1	**2.5**	La investigación se enfoca en desarrollar una solución de software de gestión integrados principalmente para las actividades de negocio de cadena de suministro.
70	(Denning & Liyanage, 2022)	1	1	1	1	**4.0**	La investigación se enfoca en herramientas relacionadas con áreas

							como modelos de preparación, modelos de madurez y marcos que ofrecen detalles sobre cómo iniciar el viaje hacia la implementación de la Industria 4.0. Esto se logra a través de una revisión sistemática de la literatura.
71	(De Lucas Ancillo et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo identifica una serie de barreras que las PYMES experimentan a la hora de poder sumergirse en la Industria 4.0, estas barreras son: Barreras tecnológicas; barreras formativas; barreras económicas; barreras contextuales.
72	(Kwarteng et al., 2022)	1	1	1	0.5	**3.5**	El estudio extiende un modelo llamado UTAUT y examina factores como actitud, facilidad de uso y el entorno de trabajo digitalizado en relación con la intención de adoptar la digitalización. Se destaca la importancia de la actitud de los dueños y gerentes de PYMES en la adopción de la digitalización.
73	(Türkeş et al., 2019)	1	0	1	1	**3.0**	El artículo analiza las opiniones y percepciones de los gerentes de las PYMES en Rumania con respecto a los impulsores y las barreras de la implementación de la tecnología de la Industria 4.0 para el desarrollo empresarial. Destaca el alto nivel de conocimiento y el deseo de implementar la Industria 4.0 en las PYMES rumanas, así como el bajo nivel de recursos necesarios para su implementación.
74	(Shqair & Altarazi, 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo encuentra que el principal obstáculo que impide la adopción de la Industria 4.0 en las pymes jordanas es la falta de conciencia de los beneficios y la importancia de aplicar las tecnologías de la Industria 4.0, en paralelo con una deficiencia en el conocimiento técnico crucial para aplicar los conocimientos de la Industria 4.0
75	(Urbano et al., 2023)	0	0	1	0.5	**1.5**	El estudio resalta cómo el uso de tecnologías digitales se convierte en un recurso versátil y relevante para las empresas cuando el entorno institucional no es tan propicio.
76	(Elhusseiny & Crispim, 2021)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo analiza las barreras y oportunidades asociadas a la adopción de la tecnología de la Industria 4.0 en países tanto en desarrollo como desarrollados a través de la revisión sistemática de literatura
77	(Peillon & Dubruc, 2019)	0.5	0	1	1	**2.5**	El artículo investiga las barreras a la servitización digital que enfrentan las pymes manufactureras en el contexto francés.

78	(Soni et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El estudio se centra en desarrollar un marco de selección de tecnología basado en "hesitant fuzzy" para determinar cuál(es) de las tecnologías de la Industria 4.0 sería(n) más adecuada(s) para la financiación sostenible de la cadena de suministro.
79	(Steinlechner et al., 2021)	0	0	1	0.5	**1.5**	Los investigadores han desarrollado un modelo de madurez de competencias digitales llamado DigCom. Este modelo consta de 49 atributos distribuidos en cuatro dimensiones para medir la madurez de las competencias a nivel individual de los empleados. El modelo tiene en cuenta tanto las competencias digitales necesarias para actividades de creación de valor directo como las competencias en áreas de apoyo.
80	(Kilimis et al., 2019)	1	0.5	1	1	**3.5**	La investigación analiza los factores que afectan las PYMES en Brandemburgo en su proceso de toma de decisiones pare la implementación efectiva de tecnologías digitales en su rutina empresarial diaria
81	(Tamvada et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo destaca la importancia de la I4.0 en la industria y sus desafíos, especialmente para las PYMES en India, y ofrece una evaluación empírica de los riesgos asociados a su implementación.
82	(R. P. Silva et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	Este trabajo investigativo propone un modelo para evaluar cuán preparadas están las PYMES y sus empleados para abrazar una transformación digital exitosa
83	(Horváth & Szabó, 2019)	1	1	1	1	**4.0**	Este estudio destaca la importancia de la dirección ejecutiva en la adopción de la Industria 4.0 e identifica resistencias organizativas y muestra diferencias entre empresas multinacionales y PYMES en este contexto.
84	(Turkyilmaz et al., 2020)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo explora los conceptos de la Industria 4.0 en países en desarrollo especialmente en Kazajstán y los impactos dentro de las PYMES así como su aplicabilidad dentro de estas empresas.
85	(Doyle & Cosgrove, 2019)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo describe un experimento financiado por la Unión Europea (UE) y coordinado por un Hub de innovación Digital (DIH) regional. El objetivo era introducir la digitalización en las operaciones de producción de una PYME de Ingeniería de Precisión en Irlanda. Se presentan los cambios realizados a la PYME, que pasó de

							informes manuales a formatos electrónicos.
86	(Stankovska et al., 2016)	0.5	0	1	0.5	**2.0**	El artículo se centra en lo relacionado con la implementación de herramientas digitales para el marketing digital y no se enfoca tanto en lo relacionado con las industrias 4.0 Muestra un modelo de implementación de herramientas de marketing digital debido a las necesidades particulares de las PYME.
87	(S. Kumar et al., 2023)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo identifica las barreras para la adopción de la sostenibilidad y la I4.0, además de establecer la interrelación entre estas barreras en las pymes. El estudio resalta la tendencia común de estas barreras en diferentes PYMES, lo que contribuye a una implementación efectiva y a la reducción de fallas en el proceso.
88	(N. A. da Silva et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo identifica las barreras para la adopción de la sostenibilidad y la I4.0, además de establecer la interrelación entre estas barreras en las pymes. El estudio resalta la tendencia común de estas barreras en diferentes PYMES, lo que contribuye a una implementación efectiva y a la reducción de fallas en el proceso.
89	(Kent et al., 2019)	1	1	1	1	**4.0**	La investigación encontró que los factores que impulsan la digitalización de los procesos de las empresas PYMES tienen un efecto positivo en la preparación y el uso de la Industria 4.0. Sin embargo, se descubrió que las barreras que dificultan el proceso de digitalización no tienen impacto en la preparación y el uso de la Industria 4.0 por parte de las empresas.
90	(Andulkar et al., 2018)	1	1	1	1	**4.0**	El estudio a través de un análisis multicriterio de varios casos de estudio determino que las PYMES tienen dificultades en áreas como la planificación y la logística, y que no todas las ideas de la Industria 4.0 son necesarias o útiles para ellas en este momento.
91	(Benites Gutiérrez et al., 2020)	0	0	0	0	**0.0**	El estudio analiza la situación competitiva de las PYMES en la ciudad de Trujillo, Perú; realizando un estudio empírico a 152 empresarios en diversos sectores de la ciudad, y se obtuvo que el 70% de las empresas del sector calzado están preparados para responder a las cinco fuerzas de Porter, para el sector metal mecánica el 89% de las

							empresas, y el 70% de las empresas para el sector textil son competitivas.
92	(Menon & Shah, 2020)	1	0.5	1	1	**3.5**	El estudio analiza las tendencias actuales y los impactos de las últimas tecnologías de las PYME centrándose en los aspectos clave de la Industria 4.0. Estudian la preparación de las PYME para adoptar las herramientas de la Industria 4.0, se identifican las tecnologías clave de dicha industria y se revisan y discuten las posibles implicaciones e impactos en su adopción.
93	(Sachdeva et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	La investigación estudia la adopción de las herramientas de la Industria 4.0 en las PYMES indias. A través de un enfoque de AHP, el artículo identifica los obstáculos clave y los clasifica según el enfoque.
94	(Surianarayanan & Menkhoff, 2020)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo examina la implementación de las herramientas de la Industria 4.0 en las PYMEs de Singapur a través de entrevistas con expertos y gerentes. Se identificaron varias barreras que incluyen altos costos de inversión, preocupaciones sobre el retorno de la inversión, inquietudes sobre la capacidad, obstáculos relacionados con la mentalidad y una falta de consideración por el medio ambiente.
95	(Orzes et al., 2018)	0.5	0.5	1	1	**3.0**	El artículo investiga empíricamente las principales barreras y dificultades que enfrentan las PYMEs en la implementación de la Industria 4.0. Se identificaron un conjunto de barreras y obstáculos, los cuales fueron clasificados en seis categorías: económico-financiero, culturales, competencias/recursos, técnicos, legales y proceso de implementación.
96	(Aranda et al., 2023)	0	0	1	1	**2.0**	La investigación tiene como objetivo identificar las habilidades técnicas necesarias para lograr resultados empresariales a través de la digitalización. Para esto, se utilizó el método Delphi y se recopilaron opiniones de un grupo de expertos españoles. El propósito era determinar la importancia de ciertas habilidades en el avance de la digitalización y la implementación de la Industria 4.0
97	(Arcidiacono et al., 2019)	1	1	1	1	**4.0**	El estudio muestra a través el estudio de casos cruzados los factores que limitan la implementación de la Industria 4.0 en las PYME en el sector automotriz. Teniendo en cuenta el

							marco TOE (tecnología, organización, entorno) se identificaron 13 barreras enfrascadas en el marco TOE. Se demostró que si no hay restricciones financieras importantes, es bueno ser proactivo y adoptar tecnologías avanzadas de la Industria 4.0 sin esperar que la competencia o los clientes lo exijan.
98	(Abdulnour et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	El estudio se enfoca en describir cómo una pequeña y mediana empresa (PYME) llevó a cabo una transformación digital en un entorno de producción en masa personalizado. Para prepararse para la implementación de la Industria 4.0, utilizaron la metodología Lean. Luego, llevaron a cabo un experimento para evaluar cómo varios factores afectaron el rendimiento de su línea de producción.
99	(Bouchard et al., 2022)	1	1	1	1	**4.0**	La investigación desarrolló una estrategia para la implementación de las herramientas de la Industria 4.0 en pymes manufactureras basada en el diseño de productos modulares, ágiles y eficientes y la validó en una empresa del sector agroalimentario de Quebec, Canadá
100	(Kraft et al., 2022)	0.5	0.5	1	1	**3.0**	El estudio investiga si los gerentes de las PYMEs en Suiza tienen una comprensión adecuada de la transformación digital y si están utilizando herramientas digitales en sus actividades administrativas y operativas. Esto podría mostrar como las PYMEs pueden aprovechar mejor las ventajas de la transformación digital.
101	(Amaral et al., 2020)	1	1	1	1	**4.0**	El artículo evalúa los modelos de implementación existentes en la literatura son apropiados para las PYMEs y propone una metodología de 5 pasos que ayude a las PYMEs a abordar y llevar a cabo con éxito (Larrea & Estensoro, 2021)industria 4.0
102	(Larrea & Estensoro, 2021)	0	0	1	1	**2.0**	El artículo explora cómo la gobernanza de las políticas relacionadas con la Industria 4.0 puede facilitar el acceso de las pequeñas y medianas empresas al conocimiento necesario relacionado con la Industria 4.0 sus características, aplicaciones y oportunidades.

B. Anexo: Número de sociedades renovadas en la jurisdicción según tamaño empresa 2020-2021

	Renovados													
	Micro empresa		Pequeña empresa		Mediana empresa		Gran empresa		Prop-unico		Sin información		Total	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento	Recuento
Persona Natural	4.624	4.958	18	24	0	1	0	0	0	0	0	0	4.642	4.983
Establecimiento de Comercio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.255	5.668	5.255	5.669
Sociedad Limitada	38	36	10	9	1	2	1	0	0	0	33	30	83	77
Sociedad Anónima	8	13	5	5	2	1	0	0	0	0	84	81	99	100
Sociedad Colectiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sociedad Comandita Simple	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	3
Sociedad Comandita por Acciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Sociedad Extranjera	4	7	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	6	9
Empresa Asociativa de Trabajo	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
Sociedad Civil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Empresa Unipersonal	13	11	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	15	13
Entidad Sin Ánimo de Lucro	695	743	0	1	0	0	0	0	0	0	7	6	702	750
Entidad de Economía Solidaria	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
Empresa Industrial y Comercial del Estado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sociedad por Acciones Simplificada	416	504	67	61	16	13	2	2	0	0	72	74	573	654
Agrarias de transformación	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Otras (personas jurídicas)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**5.805**	**6.281**	**101**	**101**	**19**	**17**	**4**	**2**	**0**	**1**	**5.455**	**5.864**	**11.384**	**12.266**

C. Anexo: Estudio Económico (Cámara de Comercio 2023)

ESTADISTICA MIPYMES (2020 - 2023)	
Etiquetas de fila	**Cuenta de MATRICULA**
MEDIANA EMPRESA	*20*
MICRO EMPRESA	*12328*
PEQUEÑA EMPRESA	*192*
Total general	**12540**

Etiquetas de fila	**Cuenta de MATRICULA**
A-Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	169
B-Explotación de minas y canteras	11
C-Industrias manufactureras	813
D-Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	2
E-Distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades	32
F-Construcción	230
G-Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas	6287
H-Transporte y almacenamiento	404
I-Alojamiento y servicios de comida	1468
J-Información y comunicaciones	201
K-Actividades financieras y de seguros	315
L-Actividades inmobiliarias	88
M-Actividades profesionales, científicas y técnicas	360
N-Actividades de servicios administrativos y de apoyo	204
P-Educación	74
Q-Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social	166
R-Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación	240
S-Otras actividades de servicios	1475
T-Actividades de los hogares en calidad de empleadores; actividades no diferenciadas de los hogares individuales como prc	1
Total general	**12540**

D. Anexo: Instrumento de Validación

	CUESTIONARIO			MODELO DE MADUREZ DE LAS PYMES
	Universidad Nacional de Colombia	Facultad de Minas	Maestría en Ingeniería Industrial	

Objetivo: Obtener datos cuantitativos sobre el nivel de madurez de las PYMES manufactureras en relación con las dimensiones establecidas del modelo.

Dirigido a: Gerentes, directivos y responsables de áreas estratégicas en la empresa.

Formato: Preguntas cerradas en escala Likert (1 a 5) y preguntas de opción múltiple.

SECCIÓN 1: DATOS GENERALES DE LA EMPRESA

Nombre de la Empresa:
Nombre del Gerente o responsable:
¿A qué sector económico pertenece su empresa? ☐ Alimentos y bebidas. ☐ Textil y confecciones. ☐ Metalmecánica. ☐ Otros:_____
Número de empleados ☐ Menos de 10.

☐ Entre 10 y 50. ☐ Entre 50 y 100. ☐ Más de 200.
¿En qué etapa de digitalización considera que se encuentra su empresa? ☐ No hemos iniciado la digitalización. ☐ Estamos explorando tecnologías digitales. ☐ Tenemos algunos procesos digitalizados. ☐ Nuestros procesos están altamente digitalizados.

Bibliografía

Abdulnour, S., Baril, C., Abdulnour, G., & Gamache, S. (2022). Implementation of Industry 4.0 Principles and Tools: Simulation and Case Study in a Manufacturing SME. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(10). https://doi.org/10.3390/su14106336

Acevedo, A. (2018). *Modelo de Madurez para la Transformación Digital* .

Agostini, L., & Filippini, R. (2019). Organizational and managerial challenges in the path toward Industry 4.0. *European Journal of Innovation Management*, *22*(3), 406–421. https://doi.org/10.1108/EJIM-02-2018-0030

Agostini, L., & Nosella, A. (2019). The adoption of Industry 4.0 technologies in SMEs: results of an international study. *Management Decision*, *58*(4), 625–643. https://doi.org/10.1108/MD-09-2018-0973

Al Mazroui, T. S. S., Al Alawi, M. M. S., Al Wahaibi, K. S. H., Al Amri, B. B. S., Thottoli, M. M., & Thottoli, M. M. (2023). Maturity of digital transformation in the shipping industry: Case study among enterprises in Gulf Cooperation Council countries. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, *20*(1). https://doi.org/10.14710/kapal.v20i1.51246

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *22*(3), 899–919. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006

Aleem, S., Capretz, L. F., & Ahmed, F. (2016). A Digital Game Maturity Model (DGMM). *Entertainment Computing*, *17*, 55–73. https://doi.org/10.1016/j.entcom.2016.08.004

Álvarez Marcos, J., Capelo Hernández, M., & Álvarez Ortiz, J. (2019). *La madurez digital de la prensa española. Estudio de caso*. https://doi.org/10.4185/RLCS-2019-1342

Amaral, A., Jorge, D., & Peças, P. (2020). Small Medium Enterprises and Industry 4.0: Current Models' Ineptitude and the proposal of a methodology to successfully implement industry 4.0 in small medium enterprises. *Procedia Manufacturing* , *41*, 1103–1110. www.sciencedirect.com

Amaral, A., & Peças, P. (2021a). A framework for assessing manufacturing smes industry 4.0 maturity. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(13). https://doi.org/10.3390/app11136127

Amaral, A., & Pecas, P. (2021). A Framework for Assessing Manufacturing SMEs Industry 4.0 Maturity. *APPLIED SCIENCES-BASEL*, *11*(13). https://doi.org/10.3390/app11136127

Amaral, A., & Peças, P. (2021b). SMEs and Industry 4.0: Two case studies of digitalization for a smoother integration. *Computers in Industry*, *125*. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103333

Andulkar, M., Tho Le, D., & Berger, U. (2018). A multi-case study on Industry 4.0 for SME's in Brandenburg, Germany. In HICSS (Ed.), *Proceedings of the 51th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 4544–4553). http://hdl.handle.net/10125/50463

Aranda, J. R., Campos, I., Cosculluela, C., San Martin, J., & De Pablos, C. (2023). Continuous vocational training in response to the challenge of industry 4.0: Required skills and business results. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *16*(2), 319. https://doi.org/10.3926/jiem.4665

Arcidiacono, F., Ancarani, A., Di Mauro, C., & Schupp, F. (2019). Where the Rubber Meets the Road. Industry 4.0 among SMEs in the Automotive Sector. *IEEE Engineering Management Review*, *47*(4), 86–93. https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2932965

Argoti Chamorro, A. C. (2009). Las Pymes Agroindustriales de Nariño Y su aporte en el desarrollo de la región. *Tendencias*, *X*(1), 7–34.

Argoti Chamorro, A. C. (2013). Las PYMES Agroindustriales de Nariño y su aporte en el desarrollo de la región. *Tendencias*, *10*, 7–34. https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rtend/article/view/608

Argoti Chamorro, A. C., & Bucheli E., V. M. (2008). *Análisis de la Capacidad Competitiva de las PYMES del Subsector Agroindustrial como dinamizadoras del desarrollo del departamento de Nariño.* . UniversidaddeNariño.

Arteaga Flórez, A. L., & De la Rosa Salazar, D. M. (2023). Factores competitivos en el sector empresarial marroquinero. Caso: pymes marroquineras departamento de Nariño. *Tendencias*, *24*(2), 86–111. https://doi.org/10.22267/rtend.232402.229

Ávila Bohórquez, J. H., & Gil Herrera, R. de J. (2022). Proposal and validation of an industry 4.0 maturity model for SMEs. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *15*(3), 433. https://doi.org/10.3926/jiem.3673

Azhar, M. N., Omar, M. N., & Shaiful, A. I. M. (2021). A case study of industry 4.0 adoption for the manufacturing SMEs in Malaysia - Are we ready? *AIP Conference Proceedings*, *2339*. https://doi.org/10.1063/5.0044571

Back, A., & Berghaus, S. (2015). *Digital maturity & transformation studie: über das digital maturity model*.

Baptista, L. F., & Barata, J. (2021). Piloting industry 4.0 in SMEs with RAMI 4.0: An enterprise architecture approach. *Procedia Computer Science*, *192*, 2826–2835. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.053

Bär, K., Herbert-Hansen, Z. N. L., & Khalid, W. (2018). Considering Industry 4.0 aspects in the supply chain for an SME. *Production Engineering*, *12*(6), 747–758. https://doi.org/10.1007/s11740-018-0851-y

Battistoni, E., Gitto, S., Murgia, G., & Campisi, D. (2023). Adoption paths of digital transformation in manufacturing SME. *International Journal of Production Economics*, *255*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108675

Belman-Lopez, C. E., Jiménez-García, J. A., & Hernández-González, S. (2020). Comprehensive analysis of design principles in the context of Industry 4.0. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, *17*(4), 432–447. https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579

Benites Gutiérrez, L. A., Ruff Escobar, C., Ruiz Toledo, M., Matheu Pérez, A., Inca Alayo, M., & Juica Martinez, P. (2020). Análisis de los factores de competitividad para la productividad sostenible de las PYMES en Trujillo, Perú. *Revisa de Métodos Cuantitativos Para La Economía y La Empresa* , *29*, 208–236.

Berghaus, S., & Back, A. (2016). Stages in Digital Business Transformation: Results of an Empirical Maturity Study. *Conference: Tenth Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS)*. http://aisel.aisnet.org/mcis2016http://aisel.aisnet.org/mcis2016/22

Berna, S., & Bell, R. (2011). *Digital transformation Creating new business models where digital meets physical.* .

Blatz, F., Bulander, R., & Dietel, M. (2018). Maturity Model of Digitization for SMEs. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1–9. https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436251

Boström, E., & Celik, O. C. (2017). *Appendix A: The Maturity Model of Digital Strategizing (MMDS) Towards a Maturity Model for Digital Strategizing A qualitative study of how an organization can analyze and assess their digital business strategy* [Umea Universitet]. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1113444/FULLTEXT01.pdf

Bouchard, S., Abdulnour, G., & Gamache, S. (2022). Agility and Industry 4.0 Implementation Strategy in a Quebec Manufacturing SME. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(13). https://doi.org/10.3390/su14137884

Brodeur, J., Deschamps, I., & Pellerin, R. (2023). Organizational changes approaches to facilitate the management of Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs.

Journal of Manufacturing Technology Management, *ahead-of-print*(ahead-of-print). https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2022-0359

Brodeur, J., Pellerin, R., & Deschamps, I. (2022). Operationalization of Critical Success Factors to Manage the Industry 4.0 Transformation of Manufacturing SMEs. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(14). https://doi.org/10.3390/su14148954

Brozzi, R., Riedl, M., & Matta, D. (2021). Key Readiness Indicators To Assess The Digital Level of Manufacturing SMEs. *Procedia CIRP*, *96*, 201–206. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.075

Busto Parra, B., Pando Cerra, P., & Álvarez Peñín, P. I. (2022). Combining ERP, Lean Philosophy and ICT: An Industry 4.0 Approach in an SME in the Manufacturing Sector in Spain. *EMJ - Engineering Management Journal*, *34*(4), 655–670. https://doi.org/10.1080/10429247.2021.2000829

Büyük, A. M., Ateş, G., Burghli, S., Yılmaz, D., Temur, G. T., & Sivri, Ç. (2021). Digital Maturity Assessment Model for Smart Agriculture. In *Digital Conversion on the Way to Industry 4.0* (pp. 289–301). https://doi.org/10.1007/978-3-030-62784-3_24

Cámara de Comercio de Ipiales. (2023). *Estudio Económico del Municipio de Ipiales y área de jurisdicción*.

Cámara de Comercio de Pasto. (2020). *Plan Estratégico Corporativo dentro de la implementación de la política corporativa "En Nariño, primero lo nuestro."*

Cámara de comercio de Pasto. (2022). *Estudio económico*. www.ccpasto.org.co

Castañeda Valencia, O. M. (2022). *Diseño de una metodología para la integración de la gestión por procesos, la tecnología de la Industria 4.0 y los principios Lean Six Sigma en las PYMEs manufactureras*.

Castelo-Branco, I., Oliveira, T., Simões-Coelho, P., Portugal, J., & Filipe, I. (2022). Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain. *Computers in Industry*, *138*, 103639. https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103639

Catlin, T., Scanlan, J., & Willmott, P. (2015). Raising your digital quotient . *McKinsey & Company*, 2–13.

Centea, D., Singh, I., Wanyama, T., Magolon, M., Boer, J., & Elbestawi, M. (2020). Using the SEPT learning factory for the implementation of industry 4.0: Case of SMEs. *Procedia Manufacturing*, *45*, 102–107. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.079

Chavez, Z., Hauge, J. B., & Bellgran, M. (2022). Industry 4.0, transition or addition in SMEs? A systematic literature review on digitalization for deviation management. In

International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Vol. 119, Issues 1–2, pp. 57–76). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s00170-021-08253-2

Chonsawat, N. ', & Sopadang, A. (2019). The Development of the Maturity Model to evaluate the Smart SMEs 4.0 Readiness. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.

Chonsawat, N., & Sopadang, A. (2020). Defining smes' 4.0 readiness indicators. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(24), 1–30. https://doi.org/10.3390/app10248998

Cimini, C., Boffelli, A., Lagorio, A., Kalchschmidt, M., & Pinto, R. (2021). How do industry 4.0 technologies influence organisational change? An empirical analysis of Italian SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *32*(3), 695–721. https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2019-0135

Competitividad, D. E. (2023). *Índice Departamental de Competitividad*.

Comunidad de los Pastos. (2017). *Programa de fortalecimiento productivo y empresarial para los pueblos indígenas en Colombia*.

Comuzzi, M., & Patel, A. (2017). How organisations leverage Big Data: a maturity model. *Industrial Management & Data Systems*, *116*(8), 1468–1492. https://doi.org/10.1108/IMDS-12-2015-0495

Contreras Pérez, J. D., Cano Buitrón, R. E., & García Melo, J. I. (2018). Methodology for the Retrofitting of Manufacturing Resources for Migration of SME towards to Industry 4.0. In Springer (Ed.), *Communications in Computer and Information Science* (pp. 337–351).

Cotrino, A., Sebastian,) ;, Miguel A, González-Gaya,) ;, & Cristina. (2020). Supply Chain Management (SCM): A New Approach for the Digital Transformation of Small and Medium Sized Entreprises (SMEs). *24th International Congress on Project Management and Engineering*, 7–10.

da Silva, N. A., Abreu, J. L., Orsolin Klingenberg, C., Antunes Junior, J. A. V., & Lacerda, D. P. (2022). Industry 4.0 and micro and small enterprises: systematic literature review and analysis. *Production and Manufacturing Research*, *10*(1), 696–726. https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2124466

Das, P., Perera, S., Senaratne, S., & Osei-Kyei, R. (2023). A smart modern construction enterprise maturity model for business scenarios leading to Industry 4.0. *Smart and Sustainable Built Environment*. https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2022-0205

Dassisti, M., Semeraro, C., & Chimenti, M. (2019). Hybrid exergetic Analysis-LCA approach and the industry 4.0 paradigm: Assessing manufacturing sustainability in an Italian SME. *Procedia Manufacturing*, *33*, 655–662. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.082

De Bruin, T., Rosemann, M., Freeze, R., & Kulkarni, U. (2005). Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. *16th Australasian Conference on Information Systems*.

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. https://doi.org/10.1108/ARLA-07-2021-0137

Deal, T. E., & Kennedy, A. A. (1982). *Corporate cultures: The rites and rituals of corporate life* (M. A.-W. Reading, Ed.).

Denison, D. R. (1990). *Corporate culture and organizational effectiveness* (New York Wiley, Ed.).

Denning, J., & Liyanage, K. (2022). Systematic Literature Review of Industry 4.0 Implementation Frameworks Focusing on Applicability in Manufacturing SMEs. *Advances in Transdisciplinary Engineering Series* , *25*, 17–24.

Díaz Jaimes, M. del P., & Ortiz Pimiento, N. R. (2012). Revisión de Modelos de Madurez: Estrategia de Evaluación del Desempeño para Empresas de Manufactura. *Junio*, *11*(1), 55–72.

Dini, M., Gligo, N., & Patiño, A. (2021). *Transformación digital de las mipymes: elementos para el diseño de políticas*.

Dossou, P. E., Laouénan, G., & Didier, J. Y. (2022a). Development of a Sustainable Industry 4.0 Approach for Increasing the Performance of SMEs. *Processes*, *10*(6). https://doi.org/10.3390/pr10061092

Dossou, P. E., Laouénan, G., & Didier, J. Y. (2022b). Development of a Sustainable Industry 4.0 Approach for Increasing the Performance of SMEs. *Processes 2022, Vol. 10, Page 1092*, *10*(6), 1092. https://doi.org/10.3390/PR10061092

Doyle, F., & Cosgrove, J. (2019). Steps towards digitization of manufacturing in an SME environment. *Procedia Manufacturing*, *38*, 540–547. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.068

Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2020). Digital transformation priorities of India's discrete manufacturing SMEs – a conceptual study in perspective of Industry 4.0. *Competitiveness Review*, 289–314. https://doi.org/10.1108/CR-03-2019-0031

Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *32*(6), 1679–1698. https://doi.org/10.1007/s10845-021-01783-2

Elhusseiny, H. M., & Crispim, J. (2021). SMEs, Barriers and Opportunities on adopting Industry 4.0: A Review. *Procedia Computer Science*, *196*, 864–871. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.086

Ericson, A., Lugnet, J., Deng Solvang, W., Kaartinen, H., & Wengren, J. (2020). Challenges of Industry 4.0 in SME business. In IEEE Industrial Electronics Society. (Ed.), *2020 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS) : 10-12 June 2020, Gjøvik, Norway.*

Ernszt, I., Jakab, B., & Kaszás, N. (2023a). The emergence of organizational and human factors in digital maturity models. *Management*, *28*(1), 123–135. https://doi.org/10.30924/mjcmi.28.1.8

Ernszt, I., Jakab, B., & Kaszás, N. (2023b). The emergence of organizational and human factors in digital maturity models. *Management*, *28*(1), 123–135. https://doi.org/10.30924/mjcmi.28.1.8

Ershova, I. V., & Enkova, E. E. (2023). Digital maturity as an indicator of the success of the university's digital transformation. *Courier of Kutafin Moscow State Law University (MSAL))*, *12*, 20–29. https://doi.org/10.17803/2311-5998.2022.100.12.020-029

Essakly, A., Wichmann, M., & Spengler, T. S. (2019). A reference framework for the holistic evaluation of Industry 4.0 solutions for SMEs. *IFAC PapersOnLine* , *52–13*, 427–432.

Estensoro, M., Larrea, M., Müller, J. M., & Sisti, E. (2022). A resource-based view on SMEs regarding the transition to more sophisticated stages of industry 4.0. *European Management Journal*, *40*(5), 778–792. https://doi.org/10.1016/j.emj.2021.10.001

Franco Ángel, M., & Urbano, D. (2019). Caracterización de las pymes colombianas y de sus fundadores: un análisis desde dos regiones del país. *Estudios Gerenciales*, 81–91. https://doi.org/10.18046/j.estger.2019.150.2968

Galindo, E. Z. (2019a). *Modelos de madurez digital en pymes-Caso de estudio de una pyme de telecomunicaciones de Colombia*.

Galindo, E. Z. (2019b). *Modelos de madurez digital en pymes-Caso de estudio de una pyme de telecomunicaciones de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia .

Galizia, F. G., Bortolini, M., & Calabrese, F. (2023). A cross-sectorial review of industrial best practices and case histories on Industry 4.0 technologies. In *Systems Engineering* (Vol. 26, Issue 6, pp. 908–924). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/sys.21697

Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2019). Development of a digital performance assessment model for Quebec manufacturing SMEs. *Procedia Manufacturing*, *38*, 1085–1094. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.196

Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2020). Evaluation of the influence parameters of Industry 4.0 and their impact on the Quebec manufacturing SMEs: The first findings. *Cogent Engineering*, *7*(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1771818

Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *9*(5), 1119. https://doi.org/10.3926/jiem.2073

Garzoni, A., De Turi, I., Secundo, G., & Del Vecchio, P. (2020). Fostering digital transformation of SMEs: a four levels approach. *Management Decision*, *58*(8), 1543–1562. https://doi.org/10.1108/MD-07-2019-0939

Gill, M., & VanBoskirk, S. (2016). *The digital maturity model 4.0 Benchmarks: Digital Business Transformation Playbook*. http://forrester.nitro-digital.com/pdf/Forrester-s%20Digital%20Maturity%20Model%204.0.pdf

Gill, M., & Vanboskirk, S. (2016). *The Digital Maturity Model 4.0 Benchmarks: Digital Business Transformation Playbook*.

Greif, H., Kühnis, N., & Warnking, P. (2016). *Digitalisierung – wo stehen Schweizer KMU?*

Grube, D., Malik, A. A., & Bilberg, A. (2019). SMEs can touch Industry 4.0 in the Smart Learning Factory. *Procedia Manufacturing*, *31*, 219–224. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.035

Gutsche, R., Cebulsky, M., & Ennemann, M. (2014). Survival of the Smartest 2.0. *Cutting through Complexity* .

Hajoary, P. K., MA, A., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Industry 4.0 maturity assessment: a multi-dimensional indicator approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*. https://doi.org/10.1108/IJPPM-07-2022-0325

Han, H., & Trimi, S. (2022). Towards a data science platform for improving SME collaboration through Industry 4.0 technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, *174*. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121242

Hoffmann, F., Lang, E., & Metternich, J. (2022). Development of a framework for the holistic generation of ML-based business models in manufacturing. *Procedia CIRP*, *107*, 209–214. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.035

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. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021

Ibrahim, S., Yusof, W. S., Pozin, M. A. A., Zahari, N. F., & Ayob, A. (2023). Smart factory governance for manufacturing SME a roadmap and practices in response to industrial 4.0. In AIP Conference Proceedings (Ed.), *THE 2ND INTERNATIONAL RECENT TRENDS IN ENGINEERING, ADVANCED COMPUTING AND TECHNOLOGY CONFERENCE (RETREAT) 2021* (p. 020077). https://doi.org/10.1063/5.0128151

James, S., & Shetty, A. (2020). Design framework for preparing workforce towards industry 4.0 implementation in small and medium-sized enterprises. *ASME 2020 15th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2020*, *2*. https://doi.org/10.1115/MSEC2020-8380

Jayashree, S., Reza, M. N. H., Malarvizhi, C. A. N., & Mohiuddin, M. (2021). Industry 4.0 implementation and Triple Bottom Line sustainability: An empirical study on small and medium manufacturing firms. *Heliyon*, *7*(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07753

Jones, M. D., Hutcheson, S., & Camba, J. D. (2021). Past, present, and future barriers to digital transformation in manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, *60*, 936–948. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.006

Kanakana-Katumba, M. G., Madadzi, R. W., & Oyesola, M. O. (2023). Smart Manufacturing systems for small medium enterprises: A conceptual data collection architecture. *Manufacturing Driving Circular Economy* , 604–613. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28839-5_68

Kane, G., Palmer, D., Phillips, A., Kiron, D., & Buckley, N. (2016). *Aligning the Future for Its Digital Organization* (Vol. 2, pp. 1–19). PwC Schweiz, Google Switzerland GmbH und digitalswitzerland.

Karltorp, L. (2017). *Digital transformation strategies in small businesses: A case study in the Swedish manufacturing industry* [Jönköping University]. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1115635/FULLTEXT01.pdf

Kazei, V., & Sengupta, M. (2022). Introduction to this special section: Digital transformation. *The Leading Edge*, *41*(9), 590–590. https://doi.org/10.1190/tle41090590.1

Kent, J. S., Jensen, W., & Philipsen, K. (2019). Drivers and Barriers for Industry 4.0 Readiness and Practice: A SME Perspective with Empirical Evidence. In HICSS (Ed.), *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Scienes* (pp. 5155–5164). https://hdl.handle.net/10125/59952

Khin, S., & Hung Kee, D. M. (2022). Identifying the driving and moderating factors of Malaysian SMEs' readiness for Industry 4.0. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *35*(7), 761–779. https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2025619

Kilimis, P., Zou, W., Lehmann, M., & Berger, U. (2019). A survey on digitalization for SMEs in Brandenburg, Germany. *IFAC-PapersOnLine*, *52*(13), 2140–2145. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.522

Kim, K.-I. (2023). Evaluation of Smart Manufacturing Innovation Readiness of Domestic SMEs According to Maturity Model. *Journal of Industrial Convergence*, *21*(1), 103–110. https://doi.org/10.22678/JIC.2023.21.1.103

Kiran, K. S., Gupta, S., Luthra, S., & Jagtap, S. (2023). Role of digitalized sustainable manufacturing in SME'S: A bibliometric analysis. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.234

Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review. *Information and Software Technology*, *51*(1), 7–15. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009

Kluth, A., Jäger, J., Schatz, A., & Bauernhansl, T. (2014). Method for a Systematic Evaluation of Advanced Complexity Management Maturity. *Procedia CIRP*, *19*, 69–74. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.041

Kohlegger, M., Maier, R., & Thalmann, S. (2009). Understanding maturity models . *I-Know '09 and I-Semantics '09*, 51–60.

Konur, S., Lan, Y., Thakker, D., Morkyani, G., Polovina, N., & Sharp, J. (2021). Towards design and implementation of Industry 4.0 for food manufacturing. *Neural Computing and Applications*. https://doi.org/10.1007/s00521-021-05726-z

Kotter, J. P., & Heskett, J. L. (1992). *Corporate culture and performance* (New Yotk: Free Press, Ed.).

Kraft, C., Lindeque, J. P., & Peter, M. K. (2022). The digital transformation of Swiss small and medium-sized enterprises: insights from digital tool adoption. *Journal of Strategy and Management*, *15*(3), 468–494. https://doi.org/10.1108/JSMA-02-2021-0063

Kumar, R., Singh, R. K., & Dwivedi, Y. K. (2020). Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges. *Journal of Cleaner Production*, *275*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124063

Kumar, S., Raut, R. D., Aktas, E., Narkhede, B. E., & Gedam, V. V. (2023). Barriers to adoption of industry 4.0 and sustainability: a case study with SMEs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *36*(5), 657–677. https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2128217

Kwarteng, M. A., Lerma, D. F. P., Ratilla, M., Novak, P., & Zlamal, L. (2022). Extending the UTAUT model to understand the barriers towards SME digitalization. *Serbian Journal of Management*, *17*(2), 403–424. https://doi.org/10.5937/sjm17-37629

Larrea, M., & Estensoro, M. (2021). Governance of Industry 4.0 policies: making knowledge services accessible for SMEs. *Regional Studies*, *55*(10–11), 1839–1850. https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1954612

Lichtblau, K., Stich, V., Bertenath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitt, E., & Schroter, M. (2015). *Industrie 4.0 Readiness*. https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en

Liu, Z., Sampaio, P., Pishchulov, G., Mehandjiev, N., Cisneros-Cabrera, S., Schirrmann, A., Jiru, F., & Bnouhanna, N. (2022). The architectural design and implementation of a digital platform for industry 4.0 SME collaboration. *Computers in Industri*, *138*(103623).

Lorenzo, O. (2016). Modelos de madurez digital: ¿En qué consisten y qué podemos aprender de ellos? / digital maturity models: what are they and what can we learn from them? . *Boletin de Estudios Económicos*, *71*(219), 573–590.

Majstorovic, V., Jankovic, G., Zivkov, S., & Stojadinovic, S. (2020). Digital Manufacturing in SMEs based on the context of the Industry 4.0 framework-one approach. *Procedia Manufacturing*, *54*, 52–57. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.009

Mario Effendy, & Arquisola, M. J. (2022). Do transformational leadership traits influence Indonesian employees' digital maturity? *International Journal of Research in Business and Social Science (2147- 4478)*, *11*(8), 128–140. https://doi.org/10.20525/ijrbs.v11i8.2167

Maristela Reis Moraes, M., & Araújo de Souza Júnior, A. (2023). CADEIA DE SUPRIMENTOS INTELIGENTE: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DO SUBSETOR DE CONCENTRADOS PARA BEBIDAS NÃO ALCOÓLICAS DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS. *Revista Científica Semana Acadêmica*, *11*(232), 1–30. https://doi.org/10.35265/2236-6717-232-12594

Marques, M., Cunha, A., Mohammed, W. M., Jardim-Gonçalves, R., & Agostinho, C. (2019). IoT-based automatic non-conformity detection: A metalworking sme use case. In *Proceedings of the I-ESA Conferences* (Vol. 9, pp. 155–165). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13693-2_13

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

Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry* , *121*, 103261.

McFarlane, D., Ratchev, S., De Silva, L., Hawkridge, G., Schönfuß, B., & Angulo, G. T. (2022). Digitalisation for SME Manufacturers: A Framework and a Low-Cost Approach. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(2), 414–419. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.229

Mehdiyev, N., Mayer, L., Lahann, J., & Fettke, P. (2022). Deep learning-based clustering of processes and their visual exploration: An industry 4.0 use case for small, medium-sized enterprises. *Expert Systems*. https://doi.org/10.1111/exsy.13139

Menon, S., & Shah, S. (2020). Are SMEs Ready for Industry 4.0 Technologies: An Exploratory Study of I 4.0 Technological Impacts. *2020 International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM)* , 203–208.

Methavitakul, B., & Santiteerakul Salinee. (2018). *Analysis of key dimension and sub-dimension for Supply Chian of Industry to fourth Industy Performance Measurement*.

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 49, pp. 194–214). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005

Mittal, S., Romero, D., & Wuest, T. (2018). *Towards a Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM3E)* (pp. 155–163). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99707-0_20

Mo, F., Monetti, F. M., Torayev, A., Rehman, H. U., Mulet Alberola, J. A., Rea Minango, N., Nguyen, H. N., Maffei, A., & Chaplin, J. C. (2023). A maturity model for the autonomy of manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *126*(1–2), 405–428. https://doi.org/10.1007/s00170-023-10910-7

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, *56*(3), 1118–1136. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647

Mohammadian, H. D., Bakhtiari, A. K., Castro, M., Wittberg, V., & Bruggemann, T. (2022). The Development of a Readiness Assessment Framework for Tomorrow's SMEs/SME 5.0 for Adopting the Educational Components of future of I4.0. *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, *2022-March*, 1699–1708. https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766609

Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, *132*, 2–17. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019

Muñoz-Pinzón, D. S., Valencia-Rivero, K. T., Caviativa-Castro, Y. P., & Castillo-Bustos, J. S. (2024). Estado actual de la adopción de la industria 4.0 en pymes colombianas:

desafíos y oportunidades. *Revista Politécnica*, *20*(39), 99–118. https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a7

Murillo, M., & Restrepo, L. (2016, May 20). *Nacimiento y supervivencia de las empresas en Colombia* . Confecámaras . https://confecamaras.org.co/phocadownload/Cuadernos_de_analisis_economico/Cuaderno_de_Analisis_Economico_N_11.pdf

Naeem, H. M., & Garengo, P. (2022). The interplay between industry 4.0 maturity of manufacturing processes and performance measurement and management in SMEs. *International Journal of Productivity and Performance Management*, *71*(4), 1034–1058. https://doi.org/10.1108/IJPPM-09-2021-0552

Nazim, M., Sodhi, H. S., & Kumar, H. (2022). A Study to Evaluate the Industry 4.0 Implementation Status Towards the Sustainability of Indian SME's. *Proceedings of the 2022 11th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends, SMART 2022*, 891–896. https://doi.org/10.1109/SMART55829.2022.10047174

Newman, M. (2017). *Digital Maturity Model (DMM): A blueprint for digital transformation*. TM Forum. www.tmforum.org

O'Hea, K. (2011). Digital Capability: How to Understand, Measure, Improve and Get Value from it. *IVI Executive Briefing Series*.

Ojha, D., Patel, P. C., & Parida, V. (2023). Virtual integration in SMEs: The digitalization circuitry of dynamic strategic planning for SMEs. *International Journal of Information Management*. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102657

Orzes, G., Rauch, E., Bednar, S., & Poklemba, R. (2018). Industry 4.0 Implementatio barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1348–1352.

Páez, G., Rohvein, C., Paravie, D., & Jaureguiberry, M. (2018). Revisión de modelos de madurez en la gestión de los procesos de negocios Review of maturity models in business processes management. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 26).

Pan Nogueras, M. L., Perea Muñoz, L., Cosentino, J. P., & Suarez Anzorena, D. (2022). RAISE 4.0: A Readiness Assessment Instrument Aimed at Raising SMEs to Industry 4.0 Starting Levels – an Empirical Field Study. In *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems* (pp. 713–720). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90700-6_81

Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., & Teppola, S. (2017). Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. *International Journal of*

Information Systems and Project Management, *5*(1), 63–77. https://doi.org/10.12821/ijispm050104

Patro, C. S., & Raghunath, K. M. K. (2021). *Digital Transformation* (pp. 16–31). https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2402-2.ch002

Peillon, S., & Dubruc, N. (2019). Barriers to digital servitization in French manufacturing SMEs. *Procedia CIRP*, *83*, 146–150. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.008

Perea Muñoz, L., Pan Nogueras, M. L., & Suarez Anzorena, D. (2022). An 'End to End' Methodological Framework to Assist SMEs in the Industry 4.0 Journey from a Sectoral Perspective - an Empirical Study in the Oil and Gas Sector. In *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems* (pp. 705–712). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90700-6_80

Pérez Uribe, R. (2007). Estructura y cultura organizacional en la Pyme Colombiana: Análisis en empresas Bogotanas. *Cuadernos de Administración* , *38*, 73–85.

Peter, O., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2023). Industry 4.0 concepts within the sub-Saharan African SME manufacturing sector. *Procedia Computer Science*, *217*, 846–855. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.281

Peukert, S., Treber, S., Balz, S., Haefner, B., & Lanza, G. (2020). Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 showcases in global production networks. *Production Engineering*, *14*(3), 275–288. https://doi.org/10.1007/s11740-020-00953-0

Pfeifer, M. R. (2021). Development of a Smart Manufacturing Execution System Architecture for SMEs: A Czech Case Study. *SUSTAINABILITY*, *13*(18). https://doi.org/10.3390/su131810181

Piat, J.-R., Danjou, C., Agard, B., & Beauchemin, R. (2023). A guideline to implement a CPS architecture in an SME. *PRODUCTION AND MANUFACTURING RESEARCH-AN OPEN ACCESS JOURNAL*, *11*(1). https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2218910

Pirola, F., Cimini, C., & Pinto, R. (2019). Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *31*(5), 1045–1083. https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0305

Plan de Desarrollo Aldana, Un Proyecto de Vida. (2020).

Powell, D., Morgan, R., & Howe, G. (2021). Lean First … then Digitalize: A Standard Approach for Industry 4.0 Implementation in SMEs. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, *631 IFIP*, 31–39. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85902-2_4

Prasad, M. M., Vijay, S., & Sutharsan, S. M. (2020). A conceptual approach for developing Industry 4.0 learning factory for Indian SMEs. *Materials Today: Proceedings* , *33*, 2936–2939.

Prokhorova, I. S., & Gureev, P. M. (2023). Digital maturity of business: Technological gap and limitations of digital transformation. *Vestnik Universiteta*, *4*, 49–56. https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-4-49-56

Quitiaquez, O. J. (2023). *PLAN DE DESARROLLO ALDANA DE LA MANO CON EL PUEBLO*.

Rahamaddulla, S. R. Bin, Leman, Z., Baharudin, B. T. H. T. Bin, & Ahmad, S. A. (2021). Conceptualizing Smart Manufacturing Readiness-Maturity Model for Small and Medium Enterprise (SME) in Malaysia. *Sustainability*, *13*(17), 9793. https://doi.org/10.3390/su13179793

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*. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103403

Rauch, E., & Brown, C. A. (2020). Teaching Axiomatic Design for a Long-Term Sustainable Introduction of Industry 4.0 in SMEs. *Procedia CIRP*, *96*, 169–174. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.155

Rauch, E., Dallasega, P., & Unterhofer, M. (2019). Requirements and Barriers for Introducing Smart Manufacturing in Small and Medium-Sized Enterprises. *IEEE Engineering Management Review*, *47*(3), 87–94. https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2931564

Rialti, R., Marzi, G., Caputo, A., & Mayah, K. A. (2020). Achieving strategic flexibility in the era of big data. *Management Decision*, *58*(8), 1585–1600. https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1237

Ricci, R., Battaglia, D., & Neirotti, P. (2021). External knowledge search, opportunity recognition and industry 4.0 adoption in SMEs. *International Journal of Production Economics*, *240*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108234

Riedel, E. (2022). MQTT protocol for SME foundries: Potential as an entry point into industry 4.0, process transparency and sustainability. *Procedia CIRP*, *105*, 601–606. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.100

Rivillas Mejia, C. D. (2022). *Modelo de madurez para la evaluación de la logística 4.0 en operaciones logísticas de ecommerce*.

Röglinger, M., & Pöppelbuß, J. (2011, June). What makes a useful maturity model? A framework for general design principles for maturity models and its demonstration in business process management. *Nineteenth European Conference on Information Systems (ECIS 2011)*.

Rotem, D., & Fisher, E. (2022). The Digital Maturity as a predictor of Organizational Resilience during a Severe Crisis. *Business and Economic Research*, *12*(4), 143. https://doi.org/10.5296/ber.v12i4.20507

Sachdeva, A., Sharma, V. K., & Singh, L. (2022). Industry 4.0 and Indian SMEs: A Study of Espousal Challenges using AHP Technique. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, *2022-December*, 1443–1448. https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989977

Schein, E. H. (2010). *Organizational culture and leadership (4th ed.)*.

Schmitt, P., Schmitt, J., & Engelmann, B. (2020). Evaluation of proceedings for SMEs to conduct I4.0 projects. *Procedia CIRP*, *86*, 257–263. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.007

Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016a). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, *52*, 161–166. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016b). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, *52*, 161–166. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Schumacher, A., & Sihn, W. (2020). Development of a monitoring system for implementation of industrial digitalization and automation using 143 key performance indicators. *Procedia CIRP*, *93*, 1310–1315. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.012

Selicati, V., & Cardinale, N. (2021). The benefits in coupling exergy analysis and life cycle assessment in the context of sustainable manufacturing for industry 4.0: A real industrial case. *International Journal of Heat and Technology*, *39*(1), 12–22. https://doi.org/10.18280/ijht.390102

Shah, S., & Mattiuzza, S. (2018). Adoption of Additive Manufacturing Approaches: The case of Manufacturing SMEs. In Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Technology Engineering and Management Society., & G. IEEE International Technology Management Conference (2018 : Stuttgart (Eds.), *Conference proceedings, ICE/IEEE ITMC 2018 : 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) : Stuttgart 17.06.-20.06.18*.

Sharma, M., Raut, R. D., Sehrawat, R., & Ishizaka, A. (2023). Digitalisation of manufacturing operations: The influential role of organisational, social, environmental, and technological impediments. *Expert Systems with Applications*, *211*. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118501

Shqair, M. I., & Altarazi, S. A. (2022). Evaluating the Status of SMEs in Jordan with Respect to Industry 4.0: A Pilot Study. *Logistics*, *6*(4). https://doi.org/10.3390/logistics6040069

Silva, R. P., Saraiva, C., & Mamede, H. S. (2022). Assessment of organizational readiness for digital transformation in SMEs. *Procedia Computer Science*, *204*, 362–369. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.044

Simetinger, F., & Basl, J. (2022). A pilot study_An assessment of manufacturing SMEs using a new Industry 4.0 maturity model for manufacturing SMEs. *Procedia Computer Science*, *200*, 1068–1077.

Soni, G., Kumar, S., Mahto, R. V., Mangla, S. K., Mittal, M. L., & Lim, W. M. (2022). A decision-making framework for Industry 4.0 technology implementation: The case of FinTech and sustainable supply chain finance for SMEs. *Technological Forecasting and Social Change*, *180*. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121686

Sonntag, M., Mehmann, S., Mehmann, J., & Teuteberg, F. (2024). Development and Evaluation of a Maturity Model for AI Deployment Capability of Manufacturing Companies. *Information Systems Management*. https://doi.org/10.1080/10580530.2024.2319041

Stankovska, I., Josimovski, S., & Edwards, C. (2016). Digital channels diminish SME barriers: The case of the UK. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja* , *29*(1), 217–232. https://doi.org/10.1080/1331677X.2016.1164926

Steinlechner, M., Schumacher, A., Fuchs, B., Reichsthaler, L., & Schlund, S. (2021). A maturity model to assess digital employee competencies in industrial enterprises. *Procedia CIRP*, *104*, 1185–1190. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.199

Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2021). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. *Production Planning and Control*, *32*(10), 811–828. https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318

Stocker, J., Herda, N., Wolf, M., & Ruf, S. (2022). A Maturity Model to Assess and Foster the Resilience of Organizations. *Art and Society*, *1*(3), 1–12. https://doi.org/10.56397/as.2022.12.01

Surianarayanan, G., & Menkhoff, T. (2020). *Outcomes of an expert survey: Are Singapore's manufacturing small and medium enterprises ready to embrace industry 4.0*.

Susanto, A. H., Simatupang, T., & Wasesa, M. (2023). Industry 4.0 Maturity Models to Support Smart Manufacturing Transformation: A Systematic Literature Review. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, *7*(2), 334–344. https://doi.org/10.29207/resti.v7i2.4588

Tamvada, J. P., Narula, S., Audretsch, D., Puppala, H., & Kumar, A. (2022). Adopting new technology is a distant dream? The risks of implementing Industry 4.0 in emerging

economy SMEs. *Technological Forecasting and Social Change*, *185*. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122088

Tang, D. (2021). What is digital transformation? *EDPACS*, *64*(1), 9–13. https://doi.org/10.1080/07366981.2020.1847813

Thordsen, T., & Bick, M. (2023). *The Importance of Platforms to Achieve Digital Maturity* (pp. 339–351). https://doi.org/10.1007/978-3-031-30694-5_25

Toapanta Guacapiña, A. P. (2018). *Sistema de Monitorización para la Industria 4.0. Un enfoque basado en Sistemas Ciberfísico.*

Toro Trejos, J., & Montaño Agulo, D. (2013). *Caracterización de la Micro, Pequeña y Mediana Industria Formalizada en el Municipio de San Juan de Pasto*. Universidad de Nariño .

Traganos, K., Grefen, P., Vanderfeesten, I., Erasmus, J., Boultadakis, G., & Bouklis, P. (2021). The HORSE framework: A reference architecture for cyber-physical systems in hybrid smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, *61*, 461–494. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.003

Trullàs-Ledesma, J., & Ribas-Xirgo, L. (2009). Transforming SME manufacturing plants into evolvable systems through agents. In IEEE Industrial Electronics Society. (Ed.), *IEEE DEST 2009 : Cyber Engineering and Creating Value by Making Connections : 31st May 2009-3rd June 2009, Istanbul, Turkey*. [IEEE].

Türkeş, M. C., Oncioiu, I., Aslam, H. D., Marin-Pantelescu, A., Topor, D. I., & Căpuşneanu, S. (2019). Drivers and barriers in using industry 4.0: A perspective of SMEs in Romania. *Processes*, *7*(3). https://doi.org/10.3390/pr7030153

Turkyilmaz, A., Dikhanbayeva, D., Suleiman, Z., Shaikholla, S., & Shehab, E. (2020). Industry 4.0: Challenges and opportunities for Kazakhstan SMEs. *Procedia CIRP*, *96*, 213–218. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.077

Urbano, D., Aparicio, S., Scott, S., & Martinez-Moya, D. (2023). Inside out: The interplay between institutions and digital technologies for SMEs performance. *Entrepreneurship and Regional Development*. https://doi.org/10.1080/08985626.2023.2208555

Vance, D., Jin, M., Price, C., Nimbalkar, S. U., & Wenning, T. (2023). Smart manufacturing maturity models and their applicability: a review. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *34*(5), 735–770. https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2022-0103

Wong, A. P. H., & Kee, D. M. H. (2022). Driving Factors of Industry 4.0 Readiness among Manufacturing SMEs in Malaysia. *Information (Switzerland)*, *13*(12). https://doi.org/10.3390/info13120552

Zentner, H., Spremić, M., & Zentner, R. (2022). Effect of Management's Competencies and Digital Skills on Digital Business Model Maturity for SMEs. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, *20*(5), 514–532. https://doi.org/10.7906/indecs.20.5.2