



Efecto de la Industria 4.0 y Lean & Green para el desempeño sostenible en el sector manufactura en Santander

Autor

Alfredo Enrique Sanabria Ospino

Tutor

PhD William Stive Fajardo-Moreno

Universidad EAN

Facultad Ingeniería

Doctorado en Ingeniería de procesos

Bogotá, Colombia

2024

A Dios, por la oportunidad de poder estudiar y ayudar a la sociedad. A mi esposa, amiga y consejera Dianita, que con su amor me guio en este nuestro sueño. A mis padres, y hermanos que con su apoyo logre culminar este proyecto.

Agradecimientos

Muchas personas y entidades han contribuido al éxito en este trabajo, en primer lugar, la universidad Santo Tomás empresa que medio su confianza para apoyarme con el tiempo necesario para realizar este estudio Doctoral. La Universidad Ean, gracias a su calidad académica me formo como investigador sostenible.

A mi tutor el Dr William Stive Fajardo Moreno por motivarme cada día con sus conocimientos y consejos para seguir adelante y culminar con este estudio. Al Dr Milton Januario por toda su asesoría y servicio en la parte académica y administrativa. A la cámara de comercio de Bucaramanga (CCB) por brindarme el tejido empresarial necesario. Tambien quiero agradecer a la secretaria de competitividad del departamento de Santander, Inpulsa Colombia a las Universidades Autónoma de Bucaramanga, Pontificia Bolivariana de Santander, Universidad Mariana en Pasto, por darme la oportunidad de participar en los eventos empresariales y científicos. Gracias a los jurados evaluadores con sus asesorias y conocimiento enriquecieron este proyecto. Finalmente a los gerentes de las 181 empresas por permitirme la información necesaria para validar el modelo.

Contenido

	Pág.
1.Introducción.....	17
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.2.1 La Industria 4.0 como soporte de Lean & Green.....	19
1.2.2 La Industria 4.0 Lean & Green y el desempeño sostenible	22
1.2.3 La Industria 4.0 y el desempeño sostenible	23
1.2.4 Objetivos	25
1.2.4.1 Objetivo general	25
1.2.4.2 Objetivos específicos.....	25
1.2.5 Justificación.....	26
2. Revisión sistemática de la literatura y análisis bibliométrico sobre la industria 4.0 relacionada con Lean & Green y el desempeño sostenible	28
2.2 Método	30
2.2.1 Planificación	30
2.2.2 Dirección de la revisión	31
2.3 Resultados	32
2.3.1 Marco Conceptual	34
2.3.1.1 Industria 4.0.....	34

2.3.1.1.2	Manufactura inteligente	36
2.3.1.1.3	Productos y servicios inteligentes	37
2.3.1.1.4	Trabajadores inteligentes	37
2.3.1.1.5	Cadena de suministro inteligente	38
2.3.1.2	Pensamiento Lean	39
2.3.1.3	Pensamiento Green	40
2.3.1.4	Modelo Lean & Green	41
2.3.1.4.1	Manufactura Lean & Green	43
2.3.1.4.2	Diseño de productos Lean & Green	43
2.3.1.4.3	Operarios Lean & Green	44
2.3.1.4.4	Cadena de suministro Lean & Green	44
2.3.1.5	Ecuaciones estructurales	45
2.3.1.6	Desarrollo sostenible	46
2.3.1.7	Desempeño sostenible	51
2.3.2	Teorías y modelos de sostenibilidad	53
2.3.3	Resultado del análisis bibliométrico	54
2.4	Discusión.....	79
2.4.1	Diseño del marco conceptual	82
3.	Metodología de investigación	88
3.1	Línea de investigación.....	88
3.2	Tipo de investigación.....	88
3.3	Fases metodológicas	89
3.3.1	Fase 1	92

3.3.1.1 Brechas de investigación.....	92
3.3.1.2 Hipótesis.....	93
3.3.1.2.1 Efecto de la industria 4.0 en la cadena de suministro Lean and Green	93
3.3.1.2.2 Efecto de la industria 4.0 en Lean & Green y su impacto en el desempeño sostenible	94
3.3.1.2.3 Efecto de la Industria 4.0 en el desempeño sostenible	96
3.3.1.3 Caracterización del sector manufactura	97
3.3.1.3.1 Ubicación Geográfica	97
3.3.1.3.2 Análisis descriptivo del sector manufactura.....	98
3.3.1.3.3 Relación entre las variables empresariales	106
3.3.1.4 Diseño de la encuesta	108
3.3.2 Fase 2	110
3.3.2.1 Selección de muestra y captura de datos.....	112
4. Validación.....	116
4.1 Análisis factorial exploratorio - AFE.....	116
4.1.1 Confiabilidad y validez.....	117
4.2. Análisis factorial confirmatorio - AFC	119
4.2.1 Fiabilidad de los constructos	119
5. Resultados e interpretación.....	124
5.1 Modelo estructural.....	124
5.1.1 Evaluación del modelo estructural.....	126
5.2 Método para evaluar el efecto de mediación.....	128
5.2.1 Relación directa sin mediación.....	130

5.2.2 Relación hipotética Directa e indirecta con mediación	132
5.3 Resultados del efecto mediador	135
5.4 Validación por juicio de expertos.....	137
5.4.1 Resultados validación por expertos.....	139
6. Discusión y conclusiones	143
6.1 Análisis de resultados del modelo global	143
6.2 Análisis de bondad de ajuste del modelo de ecuaciones estructurales.....	144
6.3 Discusión y resultados de las hipótesis.....	145
6.3.1 Hipótesis 1.....	145
6.3.2 Hipótesis 2.....	147
6.3.3 Hipótesis 3.....	149
6.4 Conclusiones.....	150
6.5 Implicaciones teóricas	153
6.6 Limitaciones y futuras líneas de investigación.....	155

Lista de Figuras	Pág.
Figura 1. <i>Proceso de unificación de las bases de datos Scopus y WoS.</i>	33
Figura 2. <i>Fases metodológicas.</i>	34
Figura 3. <i>Modelo de las cuatro inteligencias</i>	39
Figura 4. <i>Modelo Lean & Green</i>	42
Figura 5. <i>Modelo integrado Industria 4.0 Lean & Green.</i>	45
Figura 6. <i>Dimensiones de los ODS</i>	48
Figura 7. <i>Objetivo 8 sistematización.</i>	49
Figura 8. <i>Objetivo 9 sistematización.</i>	50
Figura 9. <i>Objetivo 12 sistematización.</i>	51
Figura 10. <i>Relación entre Desempeño y Desarrollo sostenible</i>	54
Figura 11. <i>Comportamiento histórico publicaciones</i>	55
Figura 12. <i>Distribución geográfica publicaciones</i>	56
Figura 13. <i>Relación países y tiempo de publicaciones.</i>	57
Figura 14. <i>Nivel de citas por países.</i>	57
Figura 15. <i>Clúster de investigación</i>	58
Figura 16. <i>Listado de revistas de alto impacto</i>	59
Figura 17. <i>Principales autores</i>	60
Figura 18. <i>Autores más citados</i>	60
Figura 19. <i>Relación referencias, autores y palabras claves</i>	61
Figura 20. <i>Redes sociales de investigación</i>	62

Figura 21. <i>Mapa temático de investigación</i>	63
Figura 22. <i>Nube de palabras claves</i>	64
Figura 23. <i>Relación entre palabras claves y años</i>	64
Figura 24. <i>Relación palabras claves y países</i>	65
Figura 25. <i>Co-ocurrencias de palabras claves</i>	66
Figura 26. <i>Gráfico de densidad palabras claves</i>	67
Figura 27. <i>Relación entre palabras claves y años</i>	67
Figura 28. <i>Espectroscopía de las referencias</i>	68
Figura 29. <i>Análisis de radar</i>	79
Figura 30. <i>Principales tecnologías, prácticas Lean & Green y métricas de desempeño sostenible</i>	82
Figura 31. <i>Modelo conceptual entre tecnologías Lean & Green y Desempeño sostenible</i>	83
Figura 32. <i>Actualización 2023-2024</i>	85
Figura 33. <i>Duplicados eliminados 2024</i>	85
Figura 34. <i>Distribución documental 2023-2024</i>	86
Figura 35. <i>Palabras claves 2023-2024</i>	86
Figura 36. <i>Fases metodológicas del proyecto</i>	90
Figura 37. <i>Diagrama de flujo de la investigación</i>	91
Figura 38. <i>Modelo Conceptual</i>	97
Figura 39. <i>Número de empresas Nacionales y regionales</i>	99
Figura 40. <i>Variación anual de la producción real por departamentos</i>	100
Figura 41. <i>Variación anual de las ventas reales por departamentos</i>	101

Figura 42. <i>Comportamiento histórico sector manufactura</i>	103
Figura 43. <i>Clasificación de empresas según su tamaño</i>	104
Figura 44. <i>Relación entre edad y el número de empresas</i>	105
Figura 45. <i>Distribución de las empresas de acuerdo con el tipo de sociedad</i> ...	105
Figura 46. <i>Relación entre el número de empresas y tipo de sociedad</i>	106
Figura 47. <i>Relación entre la edad y tamaño de la sociedad</i>	107
Figura 48. <i>Modelo hipotético</i>	111
Figura 49. <i>Mailing con incrustación de la encuesta</i>	113
Figura 50. <i>Modelo de medición</i>	123
Figura 51. <i>Modelo estructural estimadores estandarizados</i>	125
Figura 52. <i>Modelo estructural estimadores no estandarizados</i>	125
Figura 53. <i>Fases de evaluación del efecto mediador</i>	129
Figura 54. <i>Proceso clasificatorio de la medición</i>	129
Figura 55. <i>Modelo estructural sin mediación estimadores estandarizados</i>	130
Figura 56. <i>Modelo estructural sin mediación estimador es no estandarizados</i> .	131
Figura 57. <i>Resultados bootstraping coeficientes no estandarizados</i>	133
Figura 58. <i>Resultados bootstraping coeficientes estandarizados</i>	133
Figura 59. <i>Fases método Delphi</i>	138
Figura 60. <i>Validación AFE</i>	139
Figura 61. <i>Validación de la fiabilidad de los constructos</i>	140
Figura 62. <i>Validación del modelo de medición</i>	141
Figura 63. <i>Validación del modelo estructural</i>	142
Figura 64. <i>Estimadores no estandarizados H1</i>	146

Figura 65. <i>Estimadores estandarizados H1</i>	147
Figura 66. <i>Resumen hipótesis</i>	152

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Características de las variables de la población analizada</i>	26
Tabla 2. <i>Herramientas Tecnológicas y de consulta científicas utilizadas</i>	30
Tabla 3. <i>Resumen aplicación de estrategia de búsqueda</i>	32
Tabla 4. <i>Relación indicador Métrica ODS 8</i>	49
Tabla 5. <i>Relación indicador Métrica ODS 9</i>	50
Tabla 6. <i>Aportes de los 68 autores</i>	69
Tabla 7. <i>Análisis multivariado</i>	75
Tabla 8. <i>Resumen actualización documentos 2023-2024</i>	87
Tabla 9. <i>Estructura metodológica</i>	90
Tabla 10. <i>Sectores manufactura regionales</i>	99
Tabla 11. <i>Sub-sectores manufactura</i>	102
Tabla 12. <i>Operacionalización del instrumento de recolección de la información</i>	108
Tabla 13. <i>Parametrización muestral</i>	114
Tabla 14. <i>Clasificación cinco principales subsectores</i>	114
Tabla 15. <i>Cargos desempeñados por los encuestados</i>	114
Tabla 16. <i>Asistencia a eventos y conferencias científicos y empresariales</i>	115
Tabla 17. <i>Métricas de confiabilidad y extracción de los factores</i>	117
Tabla 18. <i>Estimación de las comunalidades</i>	118
Tabla 19. <i>Validez y confiabilidad convergentes</i>	120
Tabla 20. <i>Criterio HTMT</i>	121

Tabla 21. <i>Cargas factoriales no estandarizadas</i>	121
Tabla 22. <i>Cargas factoriales estandarizadas</i>	122
Tabla 23. <i>Indicadores de bondad de ajuste modelo de medición</i>	124
Tabla 24. <i>Indicadores de bondad de ajuste modelo estructural</i>	126
Tabla 25. <i>Cargas factoriales no estandarizadas</i>	126
Tabla 26. <i>Análisis de significancia coeficientes estandarizados</i>	127
Tabla 27. <i>Análisis de significancia</i>	131
Tabla 28. <i>Cargas no estandarizadas modelo sin mediación</i>	132
Tabla 29. <i>Efectos directos estandarizados</i>	134
Tabla 30. <i>Efectos indirectos estandarizados</i>	134
Tabla 31. <i>Clasificación del tipo de mediación</i>	136
Tabla 32. <i>Contraste de hipótesis</i>	151

Listado de anexos

Anexo 1. <i>Listado de siglas</i>	207
Anexo 2. <i>Encuesta Desarrollada</i>	212
Anexo 3. <i>Glosario términos Industria 4.0 y Lean</i>	228
Anexo 4. <i>Encuesta de validación del modelo</i>	233

Resumen

Actualmente existe la necesidad desde la Industria de incorporar sistemas de producción que mejoren los desempeños sostenibles soportados con tecnologías. La comunidad científica ha explorado de forma teórica el apoyo de la Industria 4.0 (IN4) sobre las prácticas Lean & Green (L&G) con un posible impacto en el desempeño sostenible (DS). El objetivo de este trabajo doctoral es determinar el efecto de la IN4 y L&G en el DS del sector manufactura en el departamento de Santander. Con el fin de alcanzar este propósito, se diseñó un modelo de ecuaciones estructurales por sus siglas en inglés (SEM) para la comprobación de las hipótesis planteadas desde la literatura, como instrumento de recolección de los datos se aplicó una encuesta en 181 empresas del sector objeto de estudio. Además, se utilizó el método Delphi como herramienta de validación del modelo y los resultados ante un panel de expertos lo cual ratificaron el diseño del modelo y los hallazgos, los cuales presentan un efecto positivo de las tecnologías asociadas con la IN4 en relación con L&G mejorando el DS, en contraste con la relación directa entre la IN4 hacia el DS siendo este vínculo negativo. Por tanto, se demuestra un efecto catalizador de la IN4 hacia L&G con un resultado positivo en el DS. Este tipo de investigación ayudará a los tomadores de decisiones a entender el posible impacto de la tecnología en L&G y en el DS. Por consiguiente, optimizar la asignación de inversiones al identificar un portafolio de prácticas sostenibles con

tecnología que mejoran el triple resultado (ambiental, social y económico). Igualmente cerrar la brecha en el conocimiento en los aportes que la IN4 puede brindar a L&G y el DS.

1.Introducción

Cada vez es más difícil ignorar los efectos que tiene el cambio climático en la sociedad siendo, fundamental la búsqueda de estrategias que mitiguen los problemas ambientales vinculando con las empresas en especial al sector manufactura como actor fundamental en la búsqueda de la preservación de los recursos. Toda esta problemática ambiental ha generado incertidumbre y conciencia en la sociedad santandereana que la ha llevado a buscar soluciones optimas que puedan mitigar los riesgos ambientales que se puedan presentar a futuro. Por otro lado, la incorporación de nuevas tecnologías modernas de la IN4 genera desafíos en los industriales santandereanos, al poder comprender como su aplicación puede crear modelos de producción limpia innovadores sin sacrificar rentabilidad, logrando la eficiencia de los recursos, el cuidando el medio ambiente junto con la sociedad. Por tanto, esta investigación es relevante para la comunidad científica, el sector manufacturero y los diferentes grupos de interés en la medida que propone una solución ambiental y empresarial por medio del diseño de un modelo estadístico que permite conocer el aporte que realiza la implementación de tecnologías asociadas con la IN4; las prácticas de producción limpia L&G y el efecto en el desempeño sostenible en el sector manufactura en Santander siendo el segundo renglón más importante de la economía departamental, lo anterior dará

una hoja de ruta para los tomadores de decisiones que permitirá optimizar las inversiones en tecnología, prácticas de producción limpia L&G que mejoran el desempeño sostenible. Esta investigación se realizó en el sector manufactura Santandereano, por medio del diseño y aplicación de un instrumento de recolección de la información a 181 empresas del sector objeto de estudio, el cual permitió el diseño de un modelo estadístico multivariado con la técnica de ecuaciones estructurales (SEM) utilizando el software AMOS. Los hallazgos permitieron conocer que existe un efecto positivo y significativo de la IN4 relacionado con L&G y un efecto moderado positivo y significativo entre la IN4 y DS por medio de L&G. Sin embargo el efecto directo entre las tecnologías y el DS el efecto fue negativo y significativo. Por tanto, el DS se optimiza en la medida en que se combine la tecnología con L&G a diferencia si solo se aplica tecnologías sin prácticas de producción limpia. Además, con el objetivo de validar los resultados se utilizó el método Delphi con el utilizando la opinión de expertos en temas industriales, tecnológicos y estadísticos, los cuales avalaron el diseño, aplicación y aportes del modelo.

Este documento está estructurado en seis capítulos de la siguiente forma: Anteriormente, se abordó la introducción de la investigación, en el capítulo inicial se realizó el planteamiento del problema, en la sección dos se expone el diseño y resultados de la revisión sistemática de la literatura (RSL), junto con el análisis bibliométrico que permitió identificar las variables e información insumo del modelo. En la parte tres se planteó el enfoque metodológico llevado a cabo en la investigación junto con las hipótesis identificadas en el capítulo anterior. La sección

cuatro presenta las fases de diseño del modelo estadístico, iniciando con la exploración de los datos por medio del análisis factorial exploratorio, para corroborar estos resultados por medio del análisis factorial confirmatorio (AFE). En el capítulo cinco se planteó el modelo final de medición con el cual se probarán las tres hipótesis planteadas, se abordó la validación del modelo estadístico por medio del método Delphi para la elaboración de los juicios de expertos. Finalmente se presenta la discusión y conclusiones junto con las implicaciones teóricas, recomendaciones y futuras líneas de investigación.

1.2 Planteamiento del problema

El problema de la presente tesis doctoral se aborda desde tres ejes conceptuales en primer lugar, se trata del soporte que puede brindar la IN4 a L&G en la implementación, mejora de procesos y reducción de desperdicios industriales y ambientales. Seguidamente se analiza como la anterior combinación entre tecnologías y prácticas de producción limpia L&G puede mejorar el DS desde los pilares económicos, ambientales y sociales. Finalmente, se considera si las tecnologías sin L&G pueden mejorar el DS directamente.

1.2.1 La Industria 4.0 como soporte de Lean & Green

La IN4 presenta un gran número de ventajas y desafíos para los industriales (X. Zhu et al., 2023), por ejemplo, como consecuencia del COVID -19 las empresas están utilizando tecnologías de la IN4 como el Big data (BD), para la preparación y gestión de desastres (Nguyen et al., 2021). Asimismo, como respuesta a los cam

bios disruptivos que ocurren en el sector manufacturero, se deben replantear los procesos de fabricación implementando tecnologías de la IN4 junto con las prácticas Lean (Florescu & Barabas, 2022), convirtiéndose en una estrategia relevante que puede aportar a las empresas dentro de la IN4 para encontrar soluciones originales a situaciones complejas (Awad et al., 2022). En este mismo sentido, la comunidad científica junto con el sector industrial han reconocido la importancia de la fabricación inteligente, incorporando tecnologías como el Internet de las cosas (IoT) para mejorar la producción a través de la IN4 esta integración entre Lean con IN4 desarrolla un modelo de producción de nominado “Lean inteligente”(Tripathi, et al., 2022); siendo importante la cooperación entre la implementación de las tecnologías para facilitar la eficiencia y mejorar el desempeño de Lean (Ding et al., 2021; Rosin et al., 2020^a). Sobre este tema, los fabricantes se cuestionan la relación simbiótica entre la IN4 y las prácticas Lean, más aún si la IN4 puede sustituir a Lean (Pereira & Sachidananda, 2022).

Paralelamente, la implementación de la sostenibilidad es factor fundamental como medida de permanencia en los mercados internacionales, convirtiéndose en un indicador actual en los últimos tiempos en el sector industrial (Bortolini et al., 2022; Ding et al., 2021; Yadav et al., 2020^a), estas circunstancias de competitividad presentes en la producción mundial, sumado con la aceleración de los mercados internacionales, están obligando a los manufactureros a abordar los desafíos que se presentan entorno con la sostenibilidad de las operaciones aplicando métodos particulares para alcanzar dicho propósito convirtiendo la industria manufacturera

como actor principal en el cuidado del medio ambiente (Gupta et al., 2018; Pei et al., 2021; Wang et al., 2021).

Además; como consecuencias de las fuertes regulaciones que giran en torno al cuidado ecológico impuestas por los gobiernos, el conocimiento colectivo sobre los perjuicios del cambio climático y el mayor entendimiento de las empresa para lograr los objetivos ambientales, empieza a ser relevante en las compañía las prácticas ambientales denominadas Green (Fallahpour et al., 2021), llegando a necesitar las empresas más condiciones en sostenibilidad, rapidez en tecnologías para cumplir los requerimientos de los mercados (Slim et al., 2021), para esto las tecnología han facilitado el propósito de las prácticas Green (Rehman Khan et al., 2022); transformándose en tendencias mundiales poco investigadas en el ámbito científico e industrial (Richnák & Fidlerová, 2022); igualmente, esta celeridad del crecimiento manufacturero junto con el uso desmesurado y el desperdicio que existe de los recursos por parte de las poblaciones tiene como consecuencia los escases de estos (X. Zhu et al., 2022^a) por ejemplo, cuando existe contaminación del agua, aumentan los costos del tratamiento para volverla potable (Hopland & Kvamsdal, 2023), en contraste cuando las fuentes hídricas son potables en las comunidades los costos sanitarios se reducen, al tener agua de calidad disminuye la probabilidad de enfermedades asociadas al consumo de agua contaminada, además se reducen los tiempos y distancias de recolección mejorando la productividad de los pueblos (Organización mundial de la salud (OMS), 2023), cuando existen desperdicios de recursos se refleja un uso ineficiente de materiales, por ejemplo la eficiencia energética significa la utilización de menos energía en la

misma actividad y proceso cuando las comunidades aplican este principio, disminuyen el costo de la energía y la contaminación, sin embargo actualmente existe ineficiencia energética en las poblaciones lo cual se traduce en mayor consumo de energía del que se necesita (US Environmental Protection Agency (EPA), 2024), enfrentando a los industriales a múltiples desafíos vinculados con los recursos, lo que ha detenido el desarrollo en la implementación de IN4 (Bag et al., 2021); no obstante, las investigaciones actuales presumen sobre la relación lineal y directa sobre IN4 y L&G (Dixit et al., 2022).

1.2.2 La Industria 4.0 Lean & Green y el desempeño sostenible

La IN4 junto con Lean comparten principios en común ayudando con la protección del medio ambiente apoyando los pilares del DS en las empresas manufactureras (Ghaithan et al., 2021; Ghobakhloo & Fathi, 2020; Nascimento et al., 2022; Rosin et al., 2020^a), en dónde el aporte, de Lean es la motivación hacia cambios sociales y dispone las comunidades para implementar adecuadamente la IN4 (Alves, 2022); ejemplo de lo anterior ambos paradigmas tecnológicos y de producción pueden mejorar simultáneamente las métricas laborales y de productividad al aumentar la eficiencia en los recursos (Tripathi et al., 2022).

En este mismo sentido, la falta de confianza y capacitación en las tecnologías de la IN4 en las empresas manufactureras es efecto de los retos presentados en el incremento de la calidad y la mejora total de la productividad (X. Zhu et al., 2022b), siendo relevante estudiar la IN4 relacionado con diversas prácticas con el fin de diseñar una estrategia competitiva que impacte en el triple resultado, comprendiendo las ventajas y oportunidades (Cardinali & De Giovanni, 2022; Umar et al.,

2022a), la perspectiva de la IN4 tiene como fundamento la integración de los procesos comerciales junto con los de fabricación en la cadena de vinculados con la producción limpia y la sostenibilidad (Y. Lu et al., 2020)

También, la IN4 puede influenciar a Green impactando directamente el desempeño de la cadena de suministro logrando la digitalización de los procedimientos (Fraga-Lamas et al., 2021; Ghadge et al., 2022), con la llegada de la IN4 y el uso de tecnologías verdes se han convertido en factor fundamental de la mejora en los desempeños económicos y ambientales (K.-H. Wang et al., 2021), ejemplo de lo anterior tecnologías como la inteligencia artificial por sus siglas en inglés (AI) y el BD pueden apoyar a Green en el ecodiseño mejorando el desempeño empresarial (Paula Pinheiro et al., 2022), en donde las prácticas L&G apoyadas en tecnologías de la IN4 como BD pueden, mejorar su eficiencia impactando en el buen nombre de la industria y la confianza de las partes interesadas (Bag et al., 2021; Villalba-Diez et al., 2020), compartiendo puntos en común como la mejora en el desempeño operacional, eliminando los desperdicios y priorizando al cliente (Dixit et al., 2022). Sin embargo, faltan más estudios con el objetivo de entender y explorar como la IN4 puede ayudar a la mejora de procesos con L&G (Cifone et al., 2021; Martinho et al., 2022).

1.2.3 La Industria 4.0 y el desempeño sostenible

La IN4 trae consigo ventajas y retos para los manufactureros que están elaborando estrategias empresariales con el fin de aprovechar las oportunidades en la implementación con el fin de mejorar los desempeños sostenibles, el uso de la tecnología tiene grandes beneficios en el desempeño económico/ operacional

como: disminuir los desperdicios en el mantenimiento e inventario, además de evitar deficiencias en las máquinas, aumenta la productividad y genera estimaciones de la producción (Zekhnini et al., 2021); en donde las empresas no deben cotar los efectos de la IN4 al pilar económico/operativo, descuidando los impactos en lo ambiental y social (Cardinali & De Giovanni, 2022); por tanto, el ordenamiento de la información de los pilares económico, operacionales, ambientales y estratégicos es fundamental para la toma de decisiones con datos acertados (Castiglione et al., 2022). No obstante, faltan estudios de corte empírico con enfoque cuantitativo que ayuden con la construcción de teoría que aborden la relación entre la IN4 y las dimensiones económicas, sociales y ambientales del DS de forma integrada (Beltrami et al., 2021).

Finalmente, de acuerdo con los desafíos presentados entorno con los tres ejes problémicos y con el propósito de cerrar la brecha en investigación se plantean las tres preguntas de investigación que soportan la tesis doctoral.

¿Cuál es el efecto directo de la industria 4.0 en las prácticas Lean & Green?

¿Cuál es efecto indirecto entre la Industria 4.0 y el desempeño sostenible desde la perspectiva del triple resultado teniendo como variable mediadora las prácticas Lean & Green?

¿Cuál es el efecto directo de la industria 4.0 en el desempeño sostenible desde la perspectiva del triple resultado?

1.2.4 Objetivos

1.2.4.1 Objetivo general

Determinar el efecto de la Industria 4.0 y las prácticas Lean & Green en el desempeño sostenible del sector manufactura en el departamento de Santander.

1.2.4.2 Objetivos específicos

Identificar las variables que definen mejor el efecto de la Industria 4.0 y Lean & Green en el desempeño sostenible del sector manufactura.

Diseñar un modelo de ecuaciones estructurales para evaluar el efecto de la Industria 4.0 y Lean & Green en el desempeño sostenible.

Validar el modelo propuesto utilizando indicadores de bondad de ajuste.

Con el propósito de parametrizar la variable que se analizarán en esta investigación, la tabla 1 expone las principales características de la población objeto de estudio.

Tabla 1. *Características de las variables de la población analizada*

Variable	Grupos	Magnitud	Temporalidad
Empresas	Nacionales, regionales, sector objeto de estudio	Cantidad	2023
	Sector manufactura	Cantidad	2019-2023
Producción	Departamentos	Variación	2023
Ventas	Departamentos	Variación	2023
Tamaño	Sector Manufactura Santander	Número de empleados	2023
Edad		Años	2023
Tipo de sociedad		Número de empresas	2023
IN4		Escala	2023
L&G		Escala	2023
DS		Escala	2023

Nota : Creación propia

1.2.5 Justificación

Con el fin de lograr la prosperidad económica y desarrollo sostenible es crucial reducir el impacto al ecosistema a través de la transformación en los procedimientos de fabricación, compra de bienes y recursos utilizando tecnologías (PNUD, 2021). En un contexto más regional, Colombia, direccionado por los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) busca implementar prácticas empresariales modernas, que permitan un nuevo tipo de empresas que integren resultados ambientales y sociales aparte del beneficio económico de sus accionistas (MINISTERIO DE COMERCIO, 2020).

Por otro lado, de acuerdo con la ANDI, (2019) en su informe de transformación digital, aplicando la técnica de estadística descriptiva vinculando solo métricas financieras y operacionales en el estudio para medir el impacto de la cuarta

revolución industria, siendo las más utilizadas el aumento de las ventas, disminución de los costos, eficiencia en los procesos, retorno de la inversión y estimación de los proyectos, la investigación revela que existe un avance en la cuarta revolución industrial en Colombia; del 88% de los encuestado tienen conocimiento que es la cuarta revolución industrial en el 2019, frente al 65% reportado en el 2017; siendo las tecnologías más utilizadas por los manufactureros colombianos, la computación en la nube (CN), la analítica de datos (AD), robótica y automatización y la inteligencia de negocios con valores de 72%, 49%, 41% y 57% respectivamente.

En esta medida, diversos estudios han pretendido establecer como la IN4 ayuda a las prácticas sostenibles y esta integración impacta en el DS de las empresas sin embargo; estas investigaciones no han explorado específicamente como la IN4 y L&G aportan al DS, existiendo la necesidad de un enfoque que combine IN4 con L&G, para mejorar la producción y el DS (Amjad et al., 2021^a), presentándose una brecha de investigación en la relación entre la implementación de la IN4 y L&G y el desempeño en el rendimiento sostenible (De Giovanni & Cariola, 2021^a).

Así, el presente trabajo pretende aportar evidencia en el contexto colombiano, para entender este importante aspecto de la IN4 y L&G con el propósito de esclarecer el posible impacto en DS. Entre otros beneficios de esta tesis doctoral está en colaborar con las empresas del sector manufactura para entender como esta nueva combinación entre tecnología con L&G las puede llegar a ser más sostenibles llevándolas a convertirse de forma voluntaria en sociedades de beneficio colectivo (BIC). Los actuales métodos solo han explorado la posible

relación entre IN4, L&G y DS de forma separada y no integrada, por tanto, no se entiende el vínculo entre estas variables. Además, en la literatura no existe un conjunto de tecnologías identificadas que aporten específicamente a un grupo de prácticas L&G, que se pueda medir su desempeño con una selección de métricas económicas, ambientales y sociales. Por tanto, el diseño de un nuevo método utilizando SEM permitirá analizar la relación entre IN4, L&G; DS, también identificar el conjunto de tecnologías y prácticas L&G que mejoran una batería de indicadores de DS definidos.

2. Revisión sistemática de la literatura y análisis bibliométrico sobre la industria 4.0 relacionada con Lean & Green y el desempeño sostenible

Para soportar apropiadamente el presente trabajo en la literatura existente y con el objetivo de diseñar un modelo SEM, la comprobación de las hipótesis sobre el efecto entre la IN4, L&G y el DS, fundamentado en las investigaciones que relacionan dichos paradigmas tecnológicos y de producción limpia, la finalidad de este segundo capítulo es presentar los resultados sobre los estudios que vinculan las tecnologías relacionadas con la IN4, L&G y el DS.

Para esto, se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) junto con un análisis bibliométrico con el propósito de identificar las tendencias en investigación y tecnologías que apoyan a L&G con relación en el DS, además de los métodos de investigación aplicados. La estructura general de este capítulo es se inició, con la presentación del objetivo de la revisión sistemática de la literatura (RSL) y análisis bibliométrico, el cual se estableció con tres preguntas de investigación. Seguida

mente, se aborda el método implementado en este trabajo enfocados en la combinación de los métodos Tranfield et al. (2003) y Michán & Muñoz-Velasco. (2013). En tercer lugar, se expone las definiciones de la IN4 junto con el modelo teórico de las cuatro inteligencias de Frank et al. (2019), luego se define L&G junto con el modelo conceptual, en los siguientes párrafos se aborda el concepto de ecuaciones estructurales desarrollo sostenible, desempeño sostenible marcando la diferencia entre estos dos significados, además de las teorías y modelos que giran entorno con la sostenibilidad, finalmente se presentan las tendencias en investigación, y un conjunto de tecnologías que se relacionan desde la literatura con L&G y sus métricas de DS. Para este fin, se direccionó la captura de datos científicos al método que se utilizaron en las diversas investigaciones, el tipo de tecnologías relacionadas con la IN4 implementadas junto con L&G y su impacto en el DS, convirtiéndose en motivación explorar el vínculo entre IN4, L&G y DS, para esto se plantean las siguientes preguntas de investigación.

¿Cuáles son las tendencias en investigación sobre las tecnologías relacionadas con la industria 4.0 con L&G?

¿Cuáles son las tecnologías de la industria 4.0 que están relacionadas con L&G y el desempeño social?

¿Cuáles tecnologías de la Industria 4.0 que están relacionadas con L&G y el desempeño ambiental?

¿Cuáles son las tecnologías de la Industria 4.0 están relacionadas con L&G y el desempeño económico/operativo?

2.2 Método

Para realizar la RSL se utilizó la metodología Tranfield et al. (2003) la cual está compuesta por tres etapas: Planificación, dirección de la revisión, reporte de los resultados y comunicación.

2.2.1 Planificación

En esta primera fase se identifica la necesidad de la búsqueda; que de acuerdo con De Giovanni & Cariola. (2021^a) existe actualmente una brecha de investigación en la relación entre la implementación de la IN4, L&G y el DS siendo lo anterior el factor principal de este trabajo.

Seguidamente de ubicar la necesidad de investigación, se estructuraron los tres ejes conceptuales IN4, L&G, DS en los cuales se desarrolló la estrategia de búsqueda, guiada por las tres preguntas de investigación planteadas.

En lo que respecta a las herramientas tecnológicas utilizadas como soporte para la captura de los datos la tabla 2 ilustra el tipo de herramienta y su implementación.

Tabla 2. *Herramientas Tecnológicas y de consulta científicas utilizadas*

Herramienta	Denominación	Aplicación
Base de datos	Scopus	Repositorio de información científica, en donde se implementó la estrategia de búsqueda.
	Web of Science (WoS)	
Softwares de minería de datos científica.	Vantage Point, R studio	Posibilita realizar la unificación de las dos bases de datos Scopus y WoS, eliminando los documentos duplicados.
	Biblioshiny	
	VOSviewer	
Gestor de referencias	Mendeley	Permite generar figuras de co-ocurrencia y densidad. Permite la exportación de las bases de datos mencionadas para la correcta citación y referenciación.

Nota: Realización propia

Finalmente se delimito la búsqueda de acuerdo con la tipología del documento, actualidad, área de investigación y calidad de las revistas.

2.2.2 Dirección de la revisión

En esta segunda fase se procede a realizar la estrategia de búsqueda con el fin de capturar información certera aplicando los principios de Rumsey, (2008) buscándose las palabras claves sinónimas, acrónimos y siglas relacionadas con los tres ejes conceptuales en exploraciones realizadas inicialmente. Además, se utilizaron operadores y funciones booleanas, como los signos ortográficos asterisco y comillas, el primero permite dar proximidad y amplitud en la captura de datos, las comillas tienen por objetivo la exactitud y similitud permitiendo hacer más efectiva la búsqueda. En referencia con las funciones se aplicó el operador lógico OR que permite unir palabras sinónimas o semejantes y el operador AND, que tiene como objetivo identificar documentos que contengan exactamente los ejes temáticos planteados en la investigación para realizar la respectiva fusión entre los documentos que contengan IN4, L&G y DS. Como criterios de exclusión se limitó la búsqueda solo en el título, resumen y palabras claves, seleccionando documentos categorizados como artículos, en las áreas de Ingeniería, negocios y gestión de la contabilidad de revistas con cuartiles 1 y 2 (Q1 y Q2). Finalmente, solo se vincularon trabajos que investigaran los tópicos en marcados en los ejes temáticos en los años correspondientes desde el 2018-2023. A continuación, se presenta la ecuación de búsqueda diseñada para la recolección de información (Corpor*sustainab**” OR “Business sustainab**” OR “ Firm* sustainab**” OR “Sustainab*performan**” OR “Triple bottom line” OR “Sustai**” OR “Economic

perfor*” OR “Environ* Perfor*” OR “ Social perfor*”) AND (“Lean & Green*” OR “Lean and clean*” OR “Lean and eco*” OR “Lean manufact* “ OR “Green manufact*” OR “Lean practic*” OR “Green practic*” OR “Lean management” OR “Green management” OR “ Lean Thinking” OR “ GREEN Thinking”) AND (“Industr*4.0*” OR “Fourth Industrial Revolution” OR “4IR” OR “4 Industrial Revolution” OR “Smart industr*” OR ”Smart manufac*” OR lindustr* 4.0 tech*”).

2.3 Resultados

La tabla 3 presenta el resumen de los documentos encontrados en las dos bases por eje temático, antes del proceso de unificación, a partir de estos datos, se puede observar los ejes de mayor documentación en su respectivo orden son DS, IN4 y L&G.

Tabla 3. *Resumen aplicación de estrategia de búsqueda*

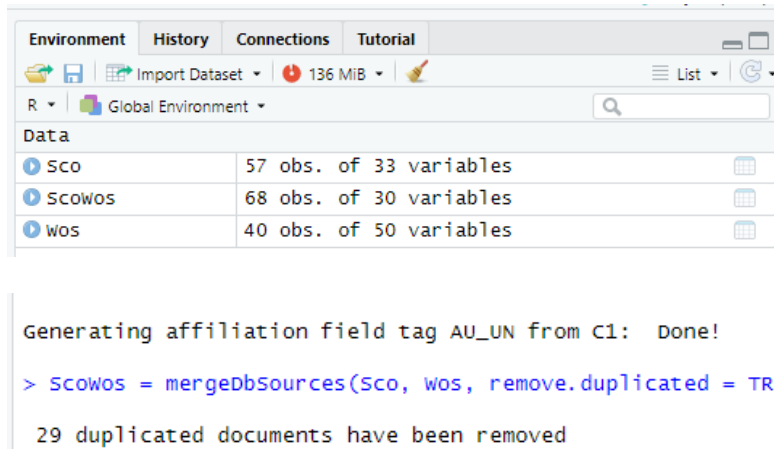
Categoría	Scopus			WoS		
	IN4	L&G	DS	IN4	L&G	DS
Exploración por pilar de investigación	33,209	17,686	1,501,190	12,147	4,38.	716,728
Solo artículo	12,720	10,133	1,022,290	10,293	3,981	620,298
Área ingeniería y negocios	8,953	6,393	212,441	6,284	2,492	127,827

Nota: Realización propia

Con base en los resultado de la aplicación de la estrategia de búsqueda se identificaron 62 documentos en Scopus y 48 en Wos de los cuales 57 y 40 pertenecen a revistas catalogadas en Q1 y Q2 para subtotal de las dos bases de datos de 97 artículos, seguidamente en el proceso de unificación realiza do en el software R studio se detectaron 29 duplicado, en las dos bases de datos para su posterior eliminación, dando como resultado final 68 documentos denomi nado por R studio “ScoWoS” los cuales se utilizaron en la construcción de la RSL

y el análisis bibliométrico al contener los tópicos de investigación (Figura 1.); por tanto, existen pocos estudios que relacionen las tecnologías con L&G y el DS.

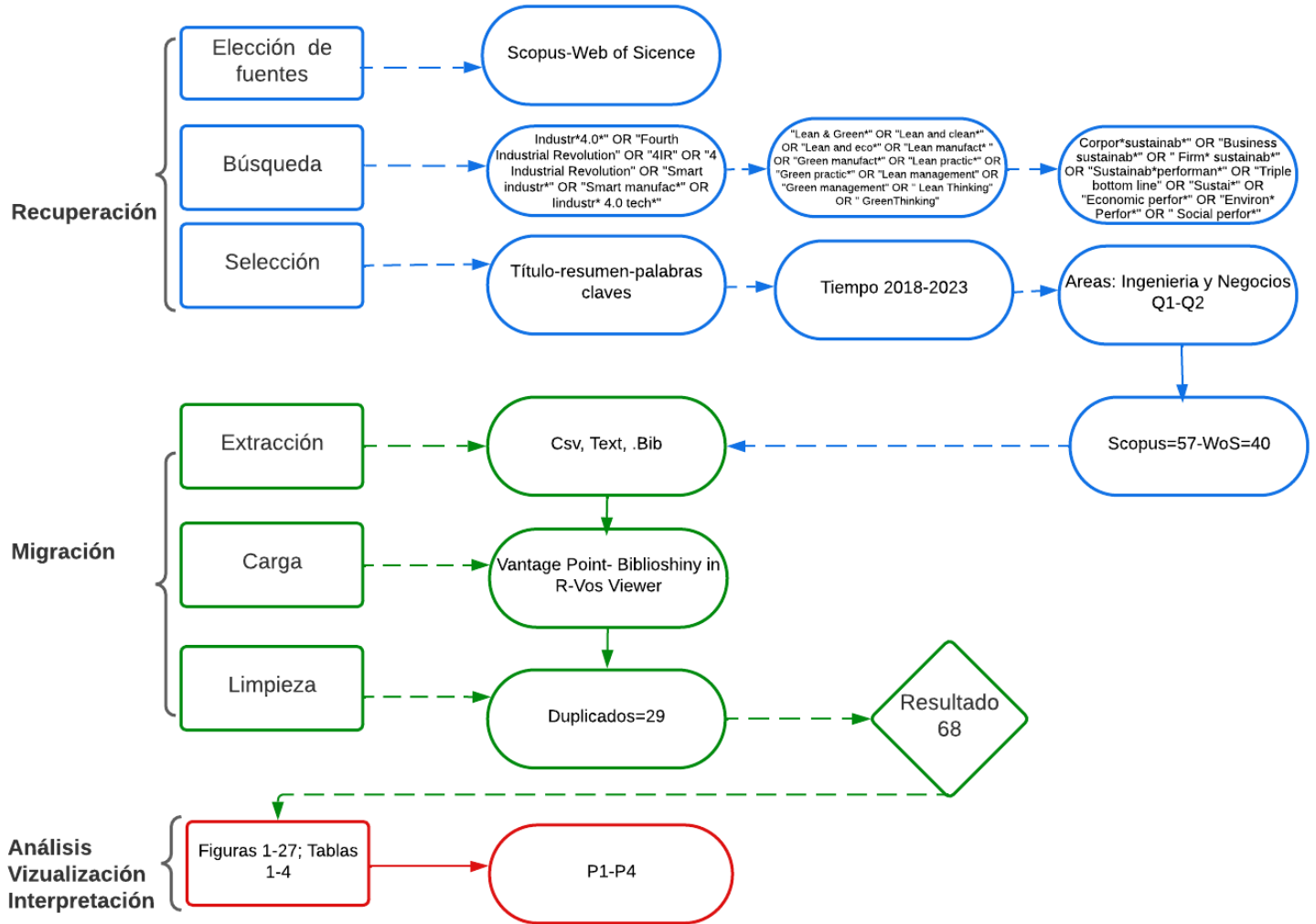
Figura 1. *Proceso de unificación de las bases de datos Scopus y WoS.*



Nota: Realización propia en Rstudio

La figura 2, presenta el resumen el método implementado desde tres fases: Recuperación, migración, finalmente, análisis, visualización e interpretación.

Figura 2. Fases metodológicas



Nota adaptada de Michán & Muñoz-Velasco (2013)

2.3.1 Marco Conceptual

2.3.1.1 Industria 4.0

En la segunda parte del siglo veinte las máquinas pasaron de ser mecánicas a digitales denominada Industria 3.0 o revolución digital, la IN4 tiene sus principios en este concepto con el objetivo de eliminar las barreras entre los espacios físicos y virtuales (Javaid et al., 2024), también se denomina cuarta revolución industrial

enfocándose en la transformación digital del sector empresarial y su fabricación (Toussaint et al., 2024) siendo la tendencia actual, la automatización y el intercambio de información entre la industria manufacturera y los diferentes sectores de la economía por medio de la aplicación de tecnologías como IA, BD, IoT, y Robótica (Soori et al., 2024). La IN4 es originaria en Alemania, impulsada por el estado, las universidades y los fabricantes, proponiendo la cuarta revolución industrial a través de la relación entre el entorno cibernético y físico con la aplicación de tecnología, como IoT, IA, BD y el Block chain (BC) en la industria manufacturera (Frank et al., 2019). Esto facilitó la inserción de un nuevo método de producción que acelera la consecución de los objetivos de los empresarios, logrando la interacción de forma experta del componente humano con los sistemas tecnológicos (Beier et al., 2020; Javaid et al., 2021; Sony & Naik, 2020). Asimismo, la IN4 se puede conceptualizarse como la agrupación entre tecnologías, dispositivos y procesos que pueden trabajar en conjunto en las distintas etapas de la fabricación y la cadena de suministro (CS), logrando una producción autosuficiente descentralizada de las decisiones, con reducida intervención del componente humano (Castelo-Branco et al., 2019). En este mismo sentido Tseng et al (2021) proponen definir la IN4 como el conjunto de tecnologías disruptivas en ambientes digitales y físicos relacionados en sistemas ciber físicos (SCF). De otra parte, la IN4 se puede agrupar en cuatro dimensiones inteligentes (Figura 3.) las cuales son: Manufactura, productos y servicios, trabajadores y CS, soportadas por tecnologías como: IoT, CN, BD y analítica de acuerdo con el modelo de las cuatro inteligencias desarrollado por Frank et al. (2019).

Por otro lado, existe la importancia de entender el vínculo de la IN4 con diferentes variables como, por ejemplo: Los ODS (Alhammadi et al., 2024), el cambio climático y el logro de emisiones cero; L&G (Fiorello et al., 2023a; Leong, Teng, How, Ngan, Rahman, et al., 2020), en el desempeño sostenible (Yavuz et al., 2023a)

2.3.1.1.2 Manufactura inteligente

Se considera la dimensión central de la IN4 y se relaciona con la producción inteligente (Frank et al., 2019) dentro de sus principales características se encuentra la flexibilidad y adaptabilidad en la fabricación de bienes, en concordancia con las necesidades específicas del consumidor de forma autosuficiente, utilizando sistemas tecnológicos evolucionados de alto desempeño y modelado que permiten llevar a la producción a su máxima capacidad (S. S. Kamble et al., 2018; Phuyal et al., 2020; S. Yang et al., 2020). En este mismo sentido, la fuerte competencia de los mercados, que está requiriendo de las industrias mejoras en la flexibilidad junto con los desempeños financieros por medio de la IN4 (Benešová et al., 2021; Ghobakhloo & Fathi, 2020); en donde los métodos de procesamiento de información empresarial son factor fundamental en la era de la IN4, convirtiéndose en insumo del paradigma de fabricación inteligente (Qu et al., 2019). Además, incorpora el análisis de datos de producción de las empresas como base para la flexibilización y eficiencia en los procesos de fabricación (Tantscher & Mayer, 2022).

2.3.1.1.3 Productos y servicios inteligentes

Esta dimensión de la IN4 es definida como la aplicación de tecnología, con el objetivo de capturar y procesar datos en la producción, mejorando la comunicación entre la oferta y la demanda aumentando la satisfacción creando valor para los consumidores (Cong et al., 2022; Machchhar et al., 2022). Una aplicación de lo anteriormente expuesto, se pueden observar en la industria textil, con el soporte brindado al cliente por medio de la Computación en la Nube (CN) como herramienta de consulta para conocer si una prenda de vestir es original accediendo por medio de un código QR a una base de procedencia de fabricación del diseñador (Kumar Reddy & Rajeshwari, 2016).

2.3.1.1.4 Trabajadores inteligentes

También, se denomina “el saber hacer 4.0” (Longo et al., 2022), son colaboradores que realizan sus tareas soportadas por máquinas, relacionándose con Robots Colaborativos (RC) flexibles llamados “Co-bots”, lo anterior permite maximizar las capacidades de ambos, aplicando sistemas de avanzada tecnología, como la realidad aumentada y virtual (RA; RV) (Fruggiero et al., 2020; Lin et al., 2022; Valentina et al., 2021); así mismo, la integración de las tecnologías de la información y comunicación (TICS) en los trabajadores logran una mejor educación efectiva que permite aumentar su cualificación generando una gran flexibilidad, y agrupándolos en una categoría específica que interactúan entre sí tomando decisiones por igual (Stock et al., 2018).

2.3.1.1.5 Cadena de suministro inteligente

Se puede definir como un conjunto de actividades e instalaciones para la compra de materiales e insumos para el desarrollo y fabricación de productos, la distribución a los clientes, sus eslabones están conformados por: proveedores, fabricantes, distribuidores y clientes finales (Beamon, 1998); por tanto, la gerencia de la CS consiste en la planificación y el control de la circulación de los materiales e información y actividades logísticas internas y externas, además de las relaciones con otras empresa (Cooper et al., 1997). En concordancia con lo anterior, como consecuencia de la aplicación de alta tecnología a toda la operación de la Cadena de Suministro (CS) es posible el monitoreo, la percepción y ajuste las cuales le otorgan la cualidad de inteligente (Liu et al., 2022); para este propósito, la IN4 permite que el sector manufactura digitalice sus operaciones, con las siguientes ventajas: transformación de la cadena de suministro a un enfoque más inteligente, mejoramiento de la captura, análisis procesamiento de información para fabricar productos, simulación de procesos y construcción de prototipos, de forma rápida que permiten lograr la satisfacción de la demanda (Y. Yu et al., 2021). La figura 3 ilustra el modelo conceptual de las cuatro inteligencias desarrollado por Frank et al. (2019).

Figura 3. *Modelo de las cuatro inteligencias*



Nota: Realización propia. Adaptado del trabajo de Frank et al. (2019)

2.3.1.2 Pensamiento Lean

Este tipo de prácticas nace con los japoneses a finales de los años cuarenta en la fábrica de Toyota (Herron & Hicks, 2008; Womack et al., 2007) como consecuencia de la incapacidad de competir con el sistema de producción en masa de Ford (SPMF). El fundamento de Lean es la mejora la Calidad Total (CT) y la disminución los Costos (Herron & Hicks, 2008; Sharma & Lata, 2018). Dentro de las bases del concepto también se concibe un sistema de producción sin desperdicios al emplear la mitad de todos los recursos esfuerzo humano, espacio, inversión y horas de trabajo, en comparación con el sistema de producción en

masa, que se estaba utilizando en Estados Unidos y Europa, siendo llamado por primera vez “Lean” por el científico John Krafcik en 1988 (Womack et al., 1992); este método de producción se considera el más importante en los procesos de manufactura (Forrester et al., 2010), dada su relevancia en la competitividad de las fábricas (Hines et al., 2004) y debido a que tiene como objetivo la disminución de inventario, tiempo de entrega y aumentar los desempeños de producción (Wahab et al., 2013). En conclusión, el concepto de Lean tiene como objetivo principal la eliminación de los procesos que no aportan valor desde el punto de vista del cliente por medio de la mejora continua para impulsar el desempeño operativo (Kunkera et al., 2022; Rahardjo et al., 2023a; M. A. Sadiq et al., 2021; Teixeira et al., 2021a).

2.3.1.3 Pensamiento Green

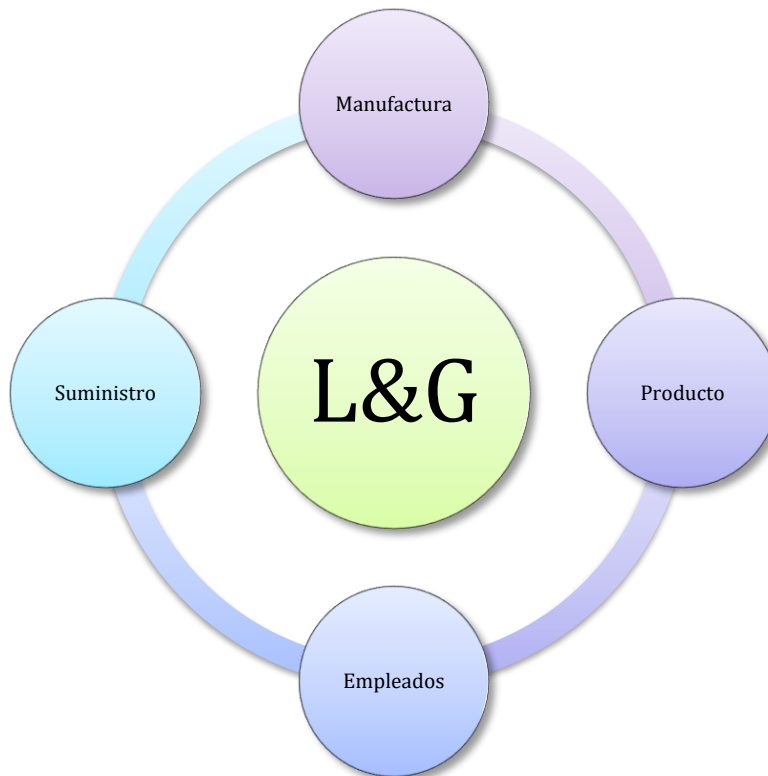
El origen de este tipo de prácticas se remonta a la década del 70 cuando se habló por primera vez del sistema de gestión ambiental (SGA) (Gallagher et al., 2004), el cual integró prácticas empresariales para el cuidado del medioambiente (Tseng et al., 2019). Este enfoque operativo ayuda a la reducción del efecto negativo de los productos y servicios en los ecosistemas, mejorando los desempeños en el pilar ambiental, sin dejar de un lado los propósitos financieros (Garza-Reyes, 2015). El principal objetivo se centra en la disminución de los desperdicios ambientales como: los gases de efecto invernadero, basuras y contaminación, el uso excesivo de recursos, energía, agua, (Hines, 2009).

2.3.1.4 Modelo Lean & Green

En la medida en que se generen innovaciones en los procesos de producción, en las empresas las motivara a desarrollar estrategias de producción limpia (Florida, 1996), la industria manufacturera ha implementado tradicionalmente el pensamiento Lean con el objetivo de mejorar la producción y eliminar los desperdicios, pero las consecuencias del cambio climático están acelerando a las empresas a fabricar productos amigables con el medio ambiente (Amjad et al., 2021; Rahardjo et al., 2023) en donde , las prácticas Lean pueden ayudar a lograr el desarrollo sostenible (W. Yu et al., 2020). También, existe un fuerte interés en las empresas en lograr la sostenibilidad, como consecuencia de las presiones influenciadas por los diferentes grupos de interés, en volverse más verdes (Cherrafi et al., 2021). Considerando lo anterior, las prácticas Green se considera un complemento importante para Lean, fortaleciendo la iniciativa de la implementación conjunta de estos paradigmas, permitiendo la fusión de conceptos bajo el término L&G en la literatura científica (Farias et al., 2019; Reis et al., 2018; Taddeo et al., 2019). Con base en lo anterior, el modelo L&G se puede definir como un conjunto de prácticas que permite el cambio hacia operaciones y productos más ecológicos que tienen por objetivo el equilibrio entre las ganancias y la eficiencia, el respeto por el medio ambiente en sus operaciones y productos (Garza-Reyes, 2015; Leong et al., 2019; Leong, Teng, How, Ngan, Abd Rahman, et al., 2020); teniendo como misión el desarrollo en paralelo de los tres pilares del desempeño sostenible (Abualfaraa et al., 2020; Azevedo et al., 2012; X. Zhu et al., 2^a22a).

También, se puede definir L&G como la unión de las prácticas de producción de Toyota, y las prácticas verdes que se implementan en el sistema de gestión ambiental, siendo su objetivo la eliminación de desperdicios industriales y ambientales simultáneamente (Pampanelli et al., 2014). Existiendo una relación positiva entre la unión de las prácticas al trabajar por un mismo objetivo la eliminación de los desperdicios ambientales e industriales (Verrier et al., 2016), la integración de estos paradigmas es relevante para el sector empresarial para comprender el efecto en el DS o en el triple resultado (Bhattacharya et al., 2019a). La Figura 4 presenta los principales componentes del modelo conceptual de L&G.

Figura 4. *Modelo Lean & Green*



Nota: Realización propia. Adaptado del trabajo de (Duarte & Cruz-Machado. (2017)

2.3.1.4.1 Manufactura Lean & Green

Estos dos enfoques tienen un punto de encuentro en la disminución de desperdicios permitiendo la eficiencia de los recursos además de reducir el daño al medio ambiente (Carvalho et al., 2014; Ng et al., 2015). Una aplicación de lo expuesto anteriormente son las disminuciones en la producción de artículos defectuosos, los tiempos de espera, el exceso inventario, asimismo, lo anterior tendrá un impacto en el costo de la electricidad, los insumos utilizados, las emisiones generadas y la utilización del espacio en las fábricas (Ng et al., 2015; US Environmental Protection Agency, 2007). Derivado de lo anterior, y con el fin de ilustrar el concepto planteado, el modelo L&G de Pampanelli. (2015), utiliza un enfoque Kaizen (K) que estudió los flujos de masa y energía en la fabricación, logrando una reducción del 5%-10% en los costos totales con base en la aplicación de los conceptos de manufactura Lean & Green.

2.3.1.4.2 Diseño de productos Lean & Green

La concepción de la elaboración de todo tipo de productos bajo los estándares de manufactura L&G tienen como principio la combinación de la eficiencia de las prácticas lean con un menor impacto ambiental soportado en el pensamiento verde (Oliveira et al., 2018; Vinodh & Rathod, 2010), por ejemplo, la eliminación de materiales tóxicos por medio del re-diseño de productos y procesos, contribuyen con la disminución de los riesgos en salud en la fábrica y clientes, aumentando la seguridad en el trabajo (Dhingra et al., 2014).

2.3.1.4.3 Operarios Lean & Green

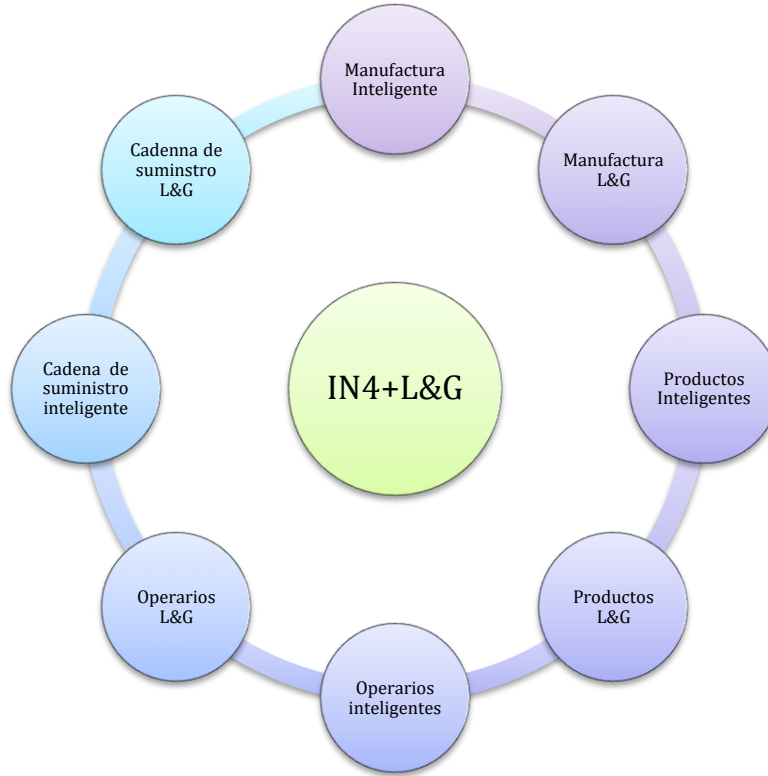
Las prácticas L&G permiten, ambientes laborales más seguros, acrecentando el trabajo en equipo, fortaleciendo la relación entre la gerencia y los empleados, generando un mayor bienestar laboral (Ng et al., 2015), para ilustrar lo anterior, cuando los empleados aplican K en el taller mejoran los procesos y la comunicación con la alta gerencia logrando detectar errores, con el fin de generar mecanismos de corrección, teniendo como resultado un proceso más rentable, eficiente y ecológico (M. Kumar & Rodrigues, 2020).

2.3.1.4.4 Cadena de suministro Lean & Green

Con respecto a L&G, tiene como estrategia el uso de los bienes y la reducción de los desperdicios a lo largo de la CS, además de tener en cuenta los aspectos ambientales (Huo et al., 2019), igualmente, al emplear la gerencia integrada de la CS con L&G puede aumentar el desempeño económico con menor impacto ambiental (Inman & Green, 2018).

Por otro lado, al compartir principios, objetivos y dimensiones en común se puede integrar la IN4 con L&G siendo catalizador las tecnologías de las prácticas como apoyo y soporte en la estrategia de producción limpia la, figura 5 presenta el modelo conceptual simbiótico entre la IN4 y L&G.

Figura 5. Modelo integrado Industria 4.0 Lean & Green



Nota: Realización propia. Adaptado del trabajo de Duarte & Cruz-Machado (2017)

2.3.1.5 Ecuaciones estructurales

Los modelos SEM permiten analizar relaciones complejas entre variables, logrando cuantificar vínculos directos e indirectos (Díaz-Reza et al., 2024), para el diseño de un modelo SEM primero se desarrollan hipótesis entre variables utilizando la RSL o el conocimiento empírico, luego se construye un boceto gráfico el cual finalmente se transforma en un modelo estadístico (L. Yang et al., 2021) que se desarrolla en dos fases, la primera es el diseño de un modelo de medición y un modelo estructural (Hussey & Eagan, 2007). El modelo de medición permite relacionar las variables observadas con las latentes, denominado también análisis

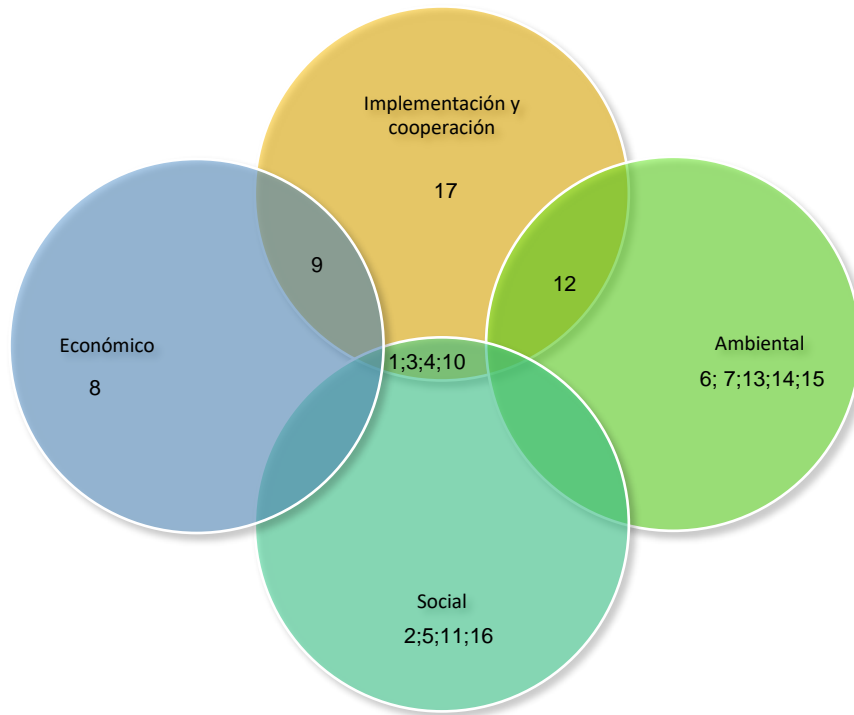
factorial confirmatorio (AFC) (Garg, 2021; Vilela et al., 2018), el cual se inicia realizando el análisis factorial exploratorio que permite (AFE) establecer el número de constructos y sus cargas (Subramanian et al., 2014). Paso siguiente de la evaluación positiva del modelo de medición los investigadores inician la etapa de evaluación del modelo estructural o interno (Kante & Michel, 2023) que tiene por objetivo la descripción de las conexiones y relaciones entre las variables de medición con una construcción hipotética utilizando un diagrama de ruta (Probst et al., 2020). Los modelos SEM divide las variables en observación y latentes, las primeras son aquellas directamente detectables, y las latentes son abstractas las cuales no se pueden estimar directamente con datos (Z.-J. Wang & Zhao, 2021). Otro tipo de variable que se puede incorporar en el estudio SEM son las mediadoras las cuales pueden adquirir esta connotación cuando se encuentran en la mitad de la relación de una variable explicativa y la independiente (Xue et al., 2018).

2.3.1.6 Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible se ha transformado en un propósito global entre los diferentes actores de la sociedad con el objetivo de lograr un futuro justo y sostenible (Akudugu & Ogwu, 2024), su importancia radica en que el mañana del planeta depende de él siendo indispensable garantizarlo; enfocado en la consecución de los 17 ODS junto con las 169 metas (Nations, 2015; Ni et al., 2023), este concepto se basa en tres dimensiones económica, social y ambiental (Khanchezarrin et al., 2023), por tanto, el incumplimiento de los ODS se convierte en una preocupación de alcance mundial (Meng et al., 2023). El informe Brundtland definió el desarrollo sostenible, “como la satisfacción de las necesidades de la

presentes generaciones, sin poner en riesgo la satisfacción de las necesidades de las futuras” (Brundtland, 1987), actualmente el concepto ha evolucionado relacionando, las circunstancias humanas, ambientales y de capital económico que logran el bienestar de la sociedad (Hajian & Kashani, 2021), para lograr dicho propósito se puede enfocar desde el alivio de los problemas ecológicos junto con una mejor igualdad social (Ma et al., 2024). Sin embargo, en el año 2019 se condicionó el alcance de la satisfacción de las necesidades de las generaciones sujeto con las situaciones convenientes de capital humano, natural y económico con el objetivo de garantizar el bienestar de la sociedad (Hajian & Kashani, 2021). Para lograr los ODS, se necesita que las compañías, reformulen sus objetivos e integren los principios de sostenibilidad en sus actividades diarias (Siddik et al., 2023), cuando los tomadores de decisiones en las empresas implementan el enfoque de los ODS se logran beneficios sostenibles (económicos, sociales y ambientales) de largo plazo para los diferentes grupos de interés (Bose et al., 2024), los cuales se pueden agrupar en 4 dimensiones junto con 108 métricas (Huan et al., 2021). La figura 6 presenta los ODS que se relacionan con los tres pilares de la sostenibilidad.

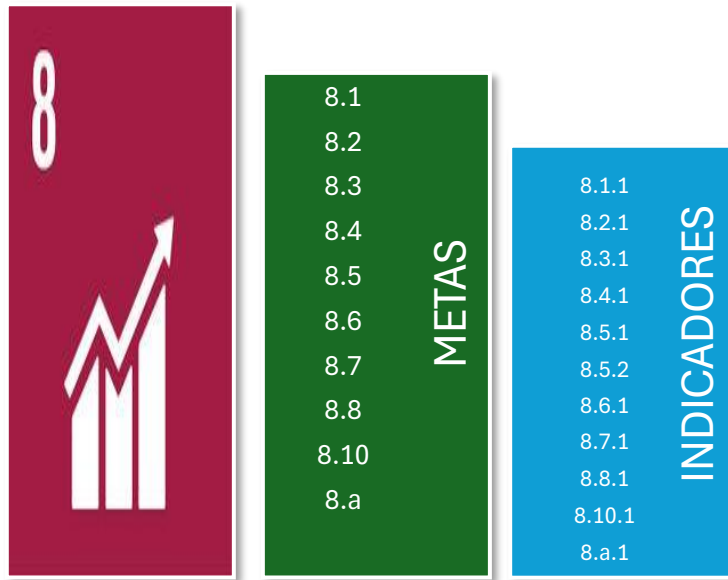
Figura 6. Dimensiones de los ODS



Nota: Creación propia utilizando los datos de Huan et al. (2021).

Planteando una relación entre el sector manufactura con los ODS se identificarán tres objetivos, en primer lugar, el objetivo 8 trabajo decente y crecimiento económico contempla 10 metas con 11 indicadores (figura 7), la tabla 4 presenta la relación entre los 11 indicadores junto con las variables de medición de forma global, teniendo como referentes, variables de corte macroeconómico, como el PIB y el desempleo.

Figura 7. Objetivo 8 sistematización



Nota: Creación propia de acuerdo con la información reportada en United Nations. (2024)

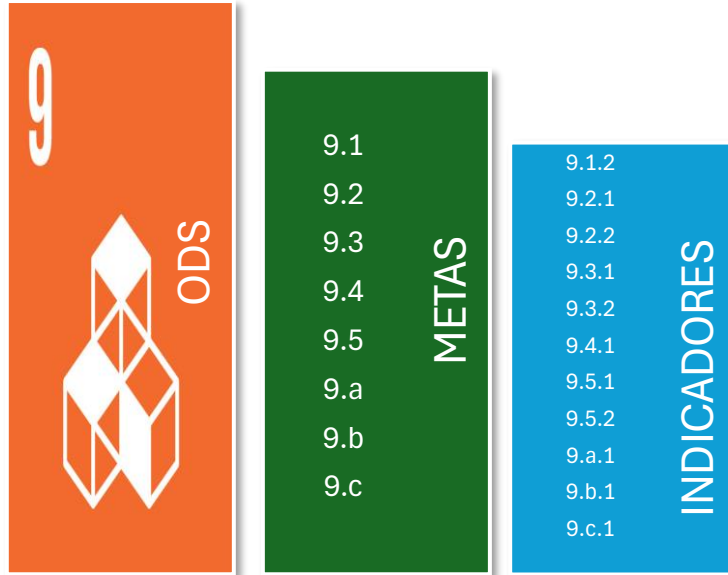
Tabla 4. Relación indicador Métrica ODS 8

Indicador	Métricas
8.1.1	Crecimiento del PIB percapita
8.2.1	Crecimiento del PIB persona empleada
8.3.1	% del empleo informal del total empleo
8.4.1	Consumo de materiales internos
8.5.1	Promedio de ingresos por hora de empleado
8.5.2	Tasa de desempleo
8.6.1	Tasa de jóvenes que no trabajan
8.7.1	Número de niños que trabajan
8.8.1	Enfermedades laborales por cada 100.000 trabajadores
8.10.1	Número de bancos y cajeros por cada 100.00 adultos
8.a.1	Desembolsos a países menos desarrollados

Nota: Creación propia de acuerdo con la información reportada en United Nations. (2024)

El objetivo 9 industria innovación e infra estructura está conformado por 8 metas junto con 11 indicadores (figura 8), la tabla 5 presenta la relación entre indicadores y métricas.

Figura 8. Objetivo 9 sistematización



Nota: Creación propia de acuerdo con la información reportada en United Nations. (2024)

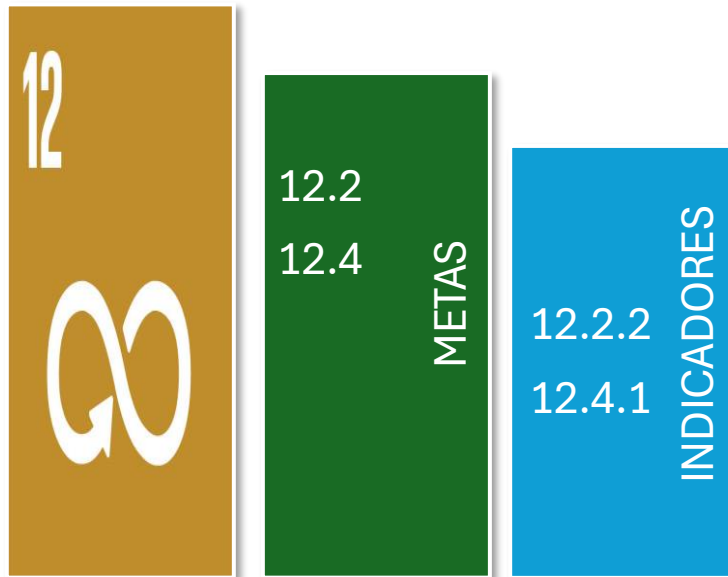
Tabla 5. Relación indicador Métrica ODS 9

Indicador	Métricas
9.1.2	Volumen de pasajeros y carga
9.2.1	Proporción del PIB del sector manufactura del total del PIB
9.2.2	Empleo manufacturero del empleo total
9.3.1	Proporción de pequeñas empresas del total industria
9.3.2	Tasas de pequeñas empresas con prestamos
9.4.1	Co2 por unidad
9.5.1	Inversión en I+D como proporción del PIB
9.5.2	Investigadores tiempo completo por 1.000.000 de habitantes
9.a.1	Apoyo internacional infraestructura
9.b.1	Fracción del valor agregado del sector tecnológico del PIB total
9.c.1	Cobertura de red móvil

Nota: Creación propia de acuerdo con la información reportada en United Nations. (2024)

Finalmente, el objetivo 12 producción y consumo responsable, representado en la figura 9 está estructurado con 2 metas e igual número de indicadores el primero plantea el consumo de materiales interno, per cápita y por el PIB, el segundo indicador mide la participación de las partes interesada en acuerdos multilaterales internacionales sobre desechos peligrosos y otros productos químicos.

Figura 9. *Objetivo 12 sistematización*



Nota: Creación propia de acuerdo con la información reportada en United Nations. (2024)

2.3.1.7 Desempeño sostenible

Se necesita de un enfoque de desempeño que beneficie a todas las partes interesadas en el transcurso de la cadena de valor en la consecución de los propósitos estratégicos, diferenciándose el DS de las perspectivas tradicionales en

la incorporación de métricas económicas ambientales y sociales (Yavuz et al., 2023b), teniendo como propósito la mitigación de los impactos ambientales como efecto de los procesos económicos (Abdelkareem et al., 2024), convirtiéndose en una estrategia fundamental para lograr las metas empresariales por medio de la aplicación de políticas y programas que ayuden a satisfacer las necesidades alcanzando los indicadores sostenibles (económicos ambientales y sociales)(Sale m et al., 2023), para medir el DS se puede agrupar en subcategorías de desempeño económico, relacionado con métricas de reducción de costos, consumo de energía y descargas residuales aumento de las ventas, utilidades y retornos de la inversión, el desempeño ambiental enfocado en el ahorro de energía y disminución de las emisiones y el social el mejoramiento del bienestar de los empleados y comunidad (PAULRAJ, 2011; Y. Yu et al., 2023; Q. Zhu et al., 2008). En contraste con el desarrollo sostenible un factor diferenciador del DS son las magnitud de las métricas de medición por ejemplo al ser el desarrollo sostenible un propósito global, en la dimensión económica tomado como referencia el ODS 8 las métricas utilizadas de acuerdo con Huan et al. (2021) son: tasa de crecimiento anual del PIB real, per cápita; Tasa de crecimiento anual del PIB real por persona ocupada; Tasa de desempleo mayor a 15 años; trabajadores asalariados; % del total del empleo, en comparación con la misma dimensión y bajo el enfoque del DS, podemos concluir que estas métricas son más de magnitud empresarial. También se puede definir DS como el realizar y consolidar los desempeños económicos, sociales y ambientales ante cualquier situación que pueda impactar las iniciativas empresariales (Hadi & Baskaran, 2021; Rodríguez-González et al.,

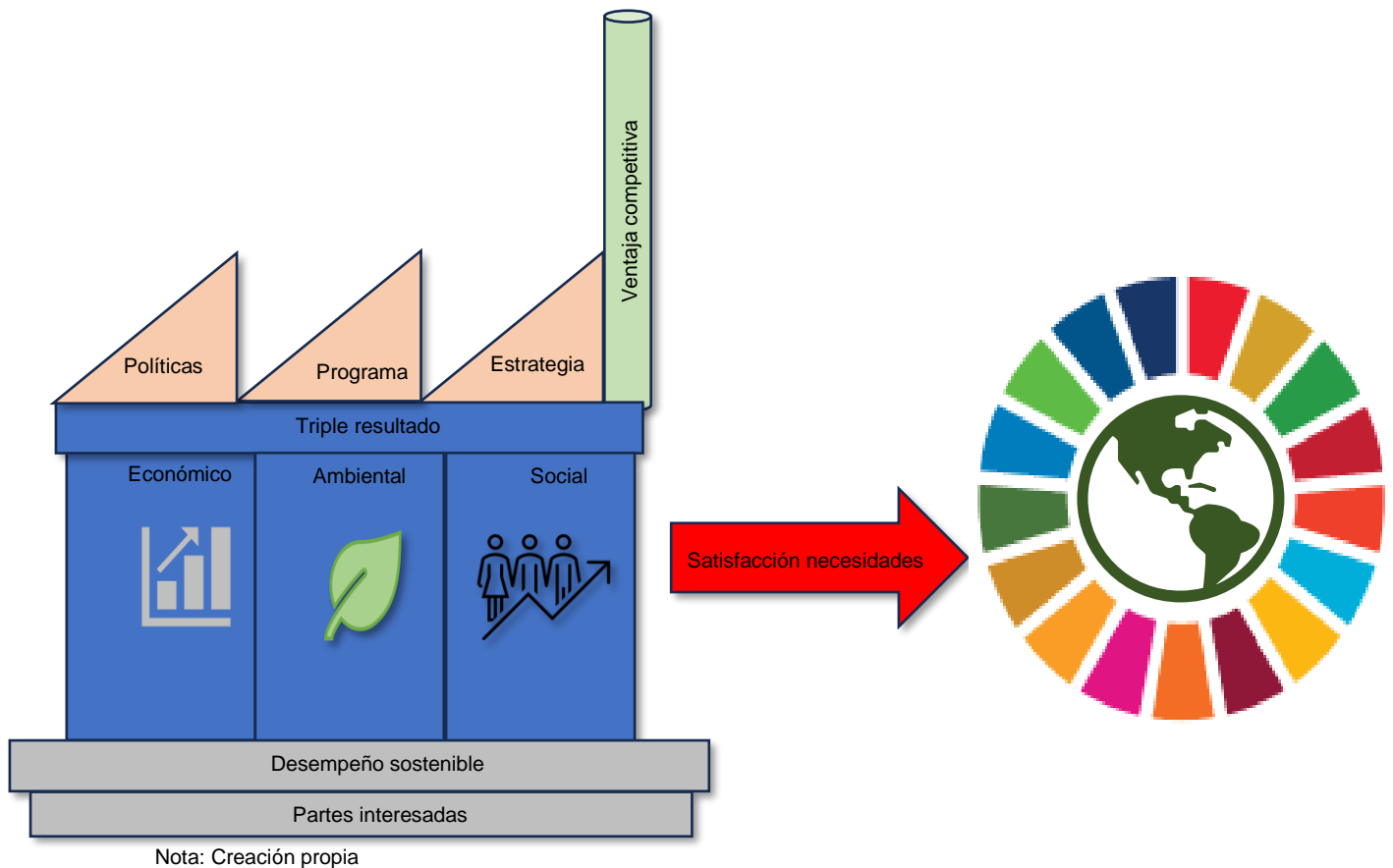
2023), lo anterior concuerda con el modelo del triple resultado desarrollado por Elkington & Rowlands, (1999) que menciona sobre el equilibrio en las empresas de los tres pilares económico, ambiental y social (Lerman et al., 2021), denominando al DS como triple resultado por sus siglas en inglés (TBL), el cual este marco se enfoca en las dimensiones económicas, ambientales y sociales (Bhattacharya et al., 2019b; Henao et al., 2019; Yee et al., 2021). Para lograr el DS las empresas deben combinar variables que las lleve a obtener la ventaja competitiva que permitan alcanzar los propósitos empresariales bajo la perspectiva del TBL (S. A. R. Khan et al., 2023). La figura 10 presenta un marco conceptual que resume, la relación y diferencia entre el desarrollo sostenible que se convierte en un propósito mundial, de la humanidad que se puede alcanzar mediante el cumplimiento de los ODS y el cual se apoya en el sector empresarial por medio de la estrategia del desempeño sostenible en marcada en el modelo del triple resultado.

2.3.2 Teorías y modelos de sostenibilidad

La teoría de los límites planetarios de Meadows et al. (1972) plantea que el crecimiento económico, continuo superaría la capacidad mundial en el siglo XXI generando una desestabilización económica y poblacional, lográndose detener si se cambiaran a tiempo los comportamientos la tecnología y la política (TURNER, 2008). Por su parte, la teoría basada en los recursos (TBR) relaciona, los saberes estratégicos de las compañías con las competencias específicas de estas (Andersen & Kheam, 1998; Barney, 1991). Una evolución de la TBR, la propuso Hart. (1995) en la teoría basada en recursos naturales (TBRN), mencionando que el rendimiento de las compañías depende de la administración de los recursos

naturales, lo anterior conecta la parte ambiental con los recursos y capacidades de las empresas (Cristina De Stefano et al., 2016).

Figura 10. *Relación entre Desempeño y Desarrollo sostenible*

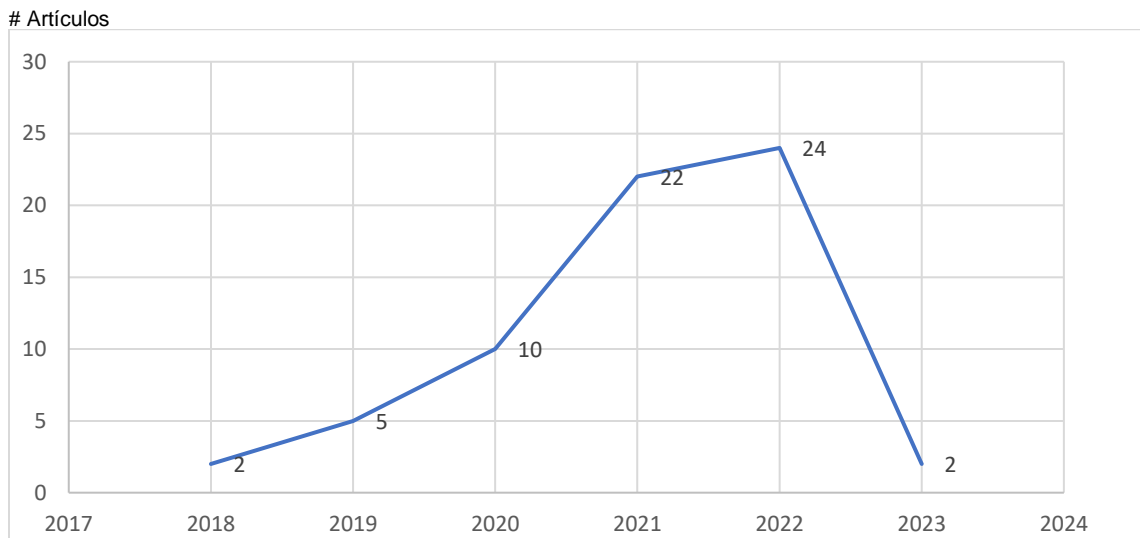


2.3.3 Resultado del análisis bibliométrico

Como resultado de la minería de datos realizado en las bases Sopus y WoS y el procesamiento de información en los softwares Vantage Point, R studio y VosViewer se presenta a continuación los resultados gráficos, en primer lugar la Figura 11 expone la distribución de los artículos a través del tiempo,

evidenciándose tendencia alcista en la producción científica, logrando una cifra máxima histórica de 24 documentos en el año 2022 con un incremento del 9% con respecto al año anterior, actualmente el número de publicaciones presenta dos registros.

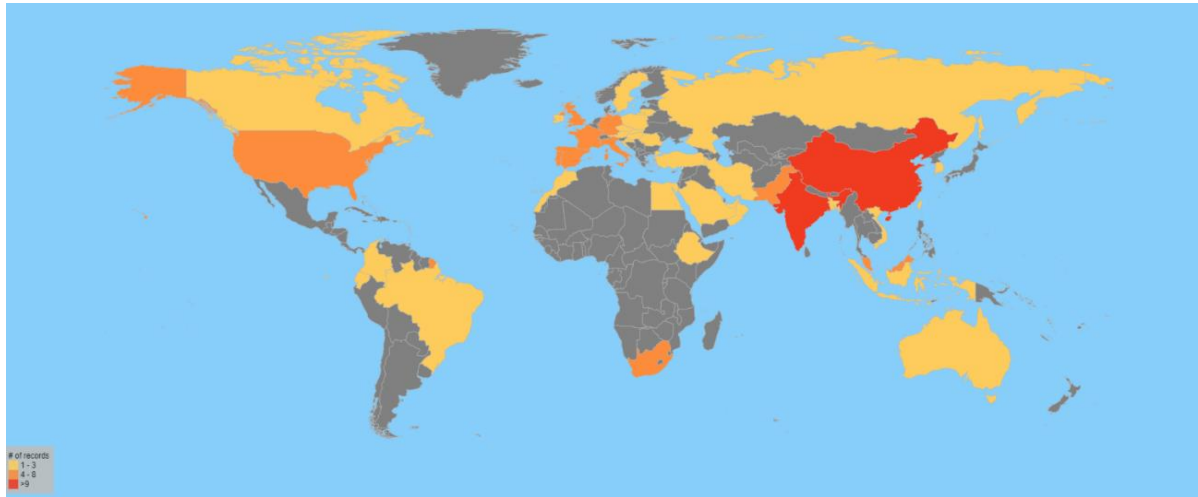
Figura 11. *Comportamiento histórico publicaciones*



Nota: Realización propia

La distribución geográfica de los documentos se presenta la figura 12, tomando como clasificación los 5 países más importantes y de acuerdo con el número de publicaciones entre paréntesis, y en su respectivo orden jerárquico encontramos a India (18), China (13), Pakistán, España y Reino Unido alcanzaron 8 registros cada uno.

Figura 12. *Distribución geográfica publicaciones*

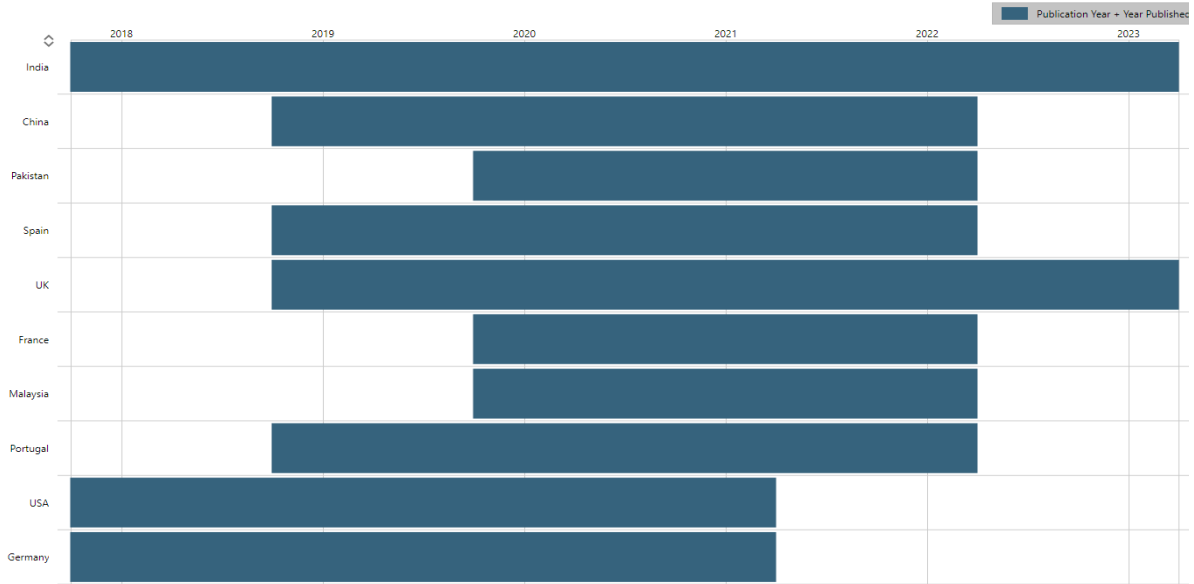


Nota: Realización propia en Vantage Point

Conforme con la distribución de las publicaciones relacionadas geográficamente con el tiempo (años), la figura 13, muestra como pioneros de investigación a India, Estados Unidos y Alemania, no obstante, solo India y Reino Unido presentan documentos en el inicio del año 2023. Como se puede observar en la figura 14, en cuanto a las citas, en correspondencia con el número de registros China lidera la lista mundial (437), seguidamente India (435), en tercer lugar, USA (226), Iran (129) y finalmente Francia (145).

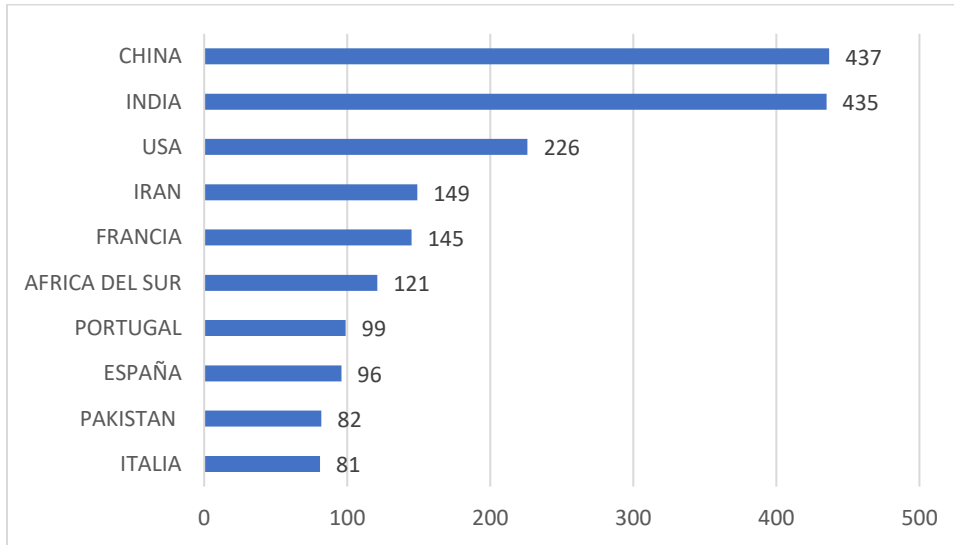
De acuerdo con los resultados presentados en el análisis de clúster, India (Círculo rojo) lidera la asociación de investigación a nivel mundial, compartiendo trabajos con países como: Malasia, República Checa, Singapur, China, Egipto, Arabia Saudita, Sur África, Marruecos, Francia, Australia, Etiopía y Pakistán (Figura 15).

Figura 13. Relación países y tiempo de publicaciones



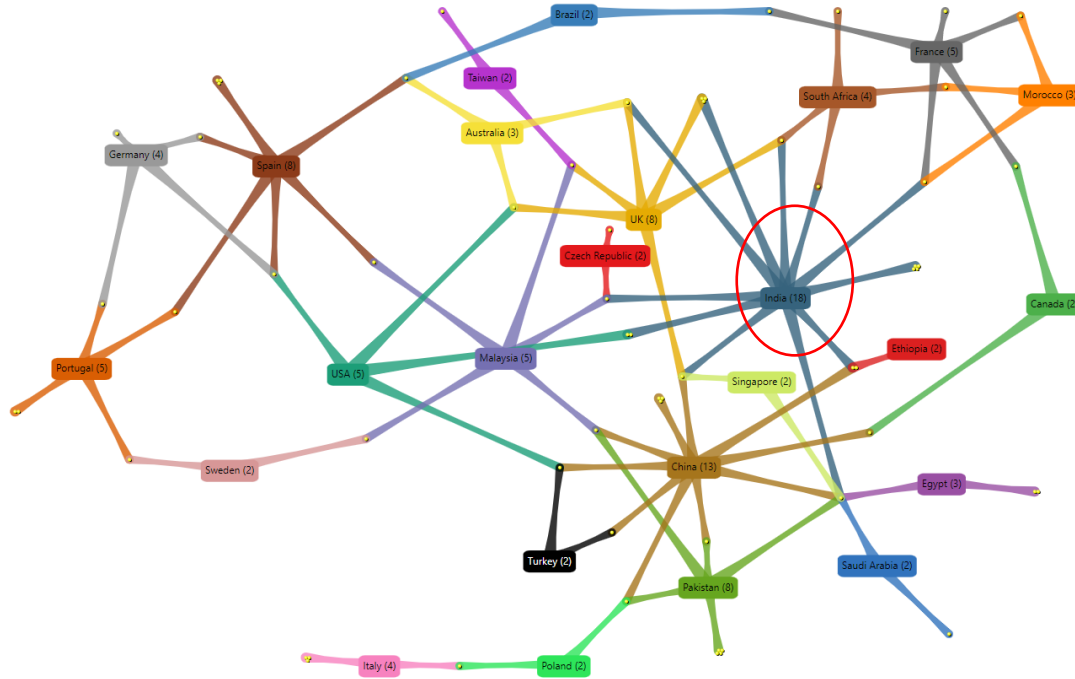
Nota: Realización propia en Vantage Point

Figura 14. Nivel de citaciones por países



Nota: Realización propia con la información de Biblioshiny-Bibliometrix

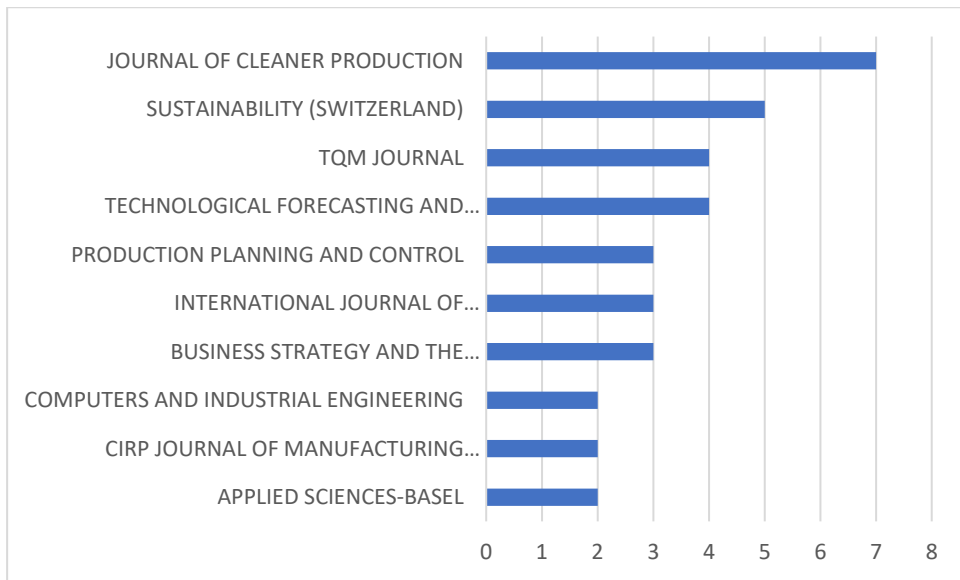
Figura 15. Clúster de investigación



Nota: Realización propia en Vantage Point

Por otro lado, la figura 16 expone las revistas de mayor impacto catalogadas en los cuartiles 1 y 2 (Q1-Q2) entre la cuales se destacan de acuerdo con el número de registros entre paréntesis: Journald of cleaner production (7), Sustainability (5), technological forecating and social change y TQM con 4 documentos respectivamente.

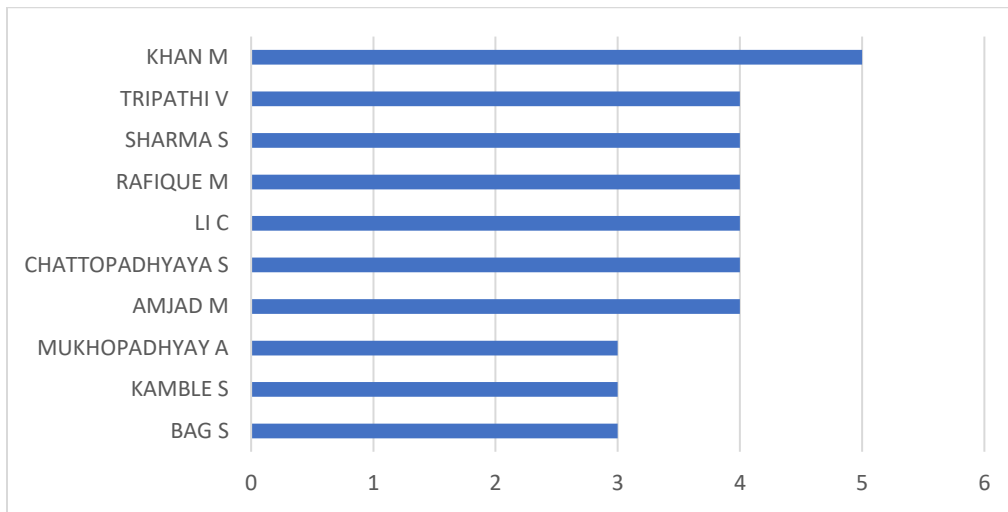
Figura 16. *Listado de revistas de alto impacto*



Nota: Realización propia con información de Biblioshiny-Bibliometrix

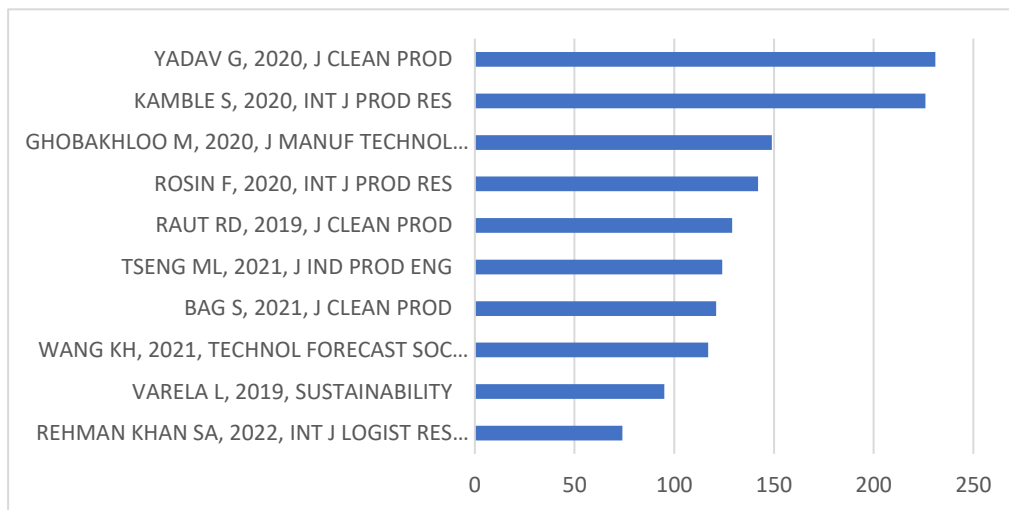
En lo concerniente a los autores más importante la figura 17 ilustra la producción científica por investigador relacionada con el número de publicaciones, siendo el líder el investigador de Pakistán Khan, Mohammad Amir con 5 documentos, distribuidos por año de la siguiente forma; en el 2020 (1) en el 2021 (4) con un total de citaciones por año de 28, sin embargo el autor más citado es el francés Kamble, Sachin S, con tres documentos producidos uno por año desde la época del 2020 hasta el 2022 que registran un total de 65 citaciones por año. Tomando como clasificación los 5 principales autores y documentos citados de acuerdo con el número de registros, inicialmente encontramos a Yadav et al. (2020), con 231, S. Kamble et al. (2020) con 226; en tercer lugar Ghobakhloo & Fathi. (2019) 149, seguidamente Rosin et al.(2020b) con 142, finalmente, Raut et al. (2019) con 129 (Figura 18).

Figura 17. Principales autores



Nota: Realización propia con información de Biblioshiny-Bibliometrix

Figura 18. Autores más citados



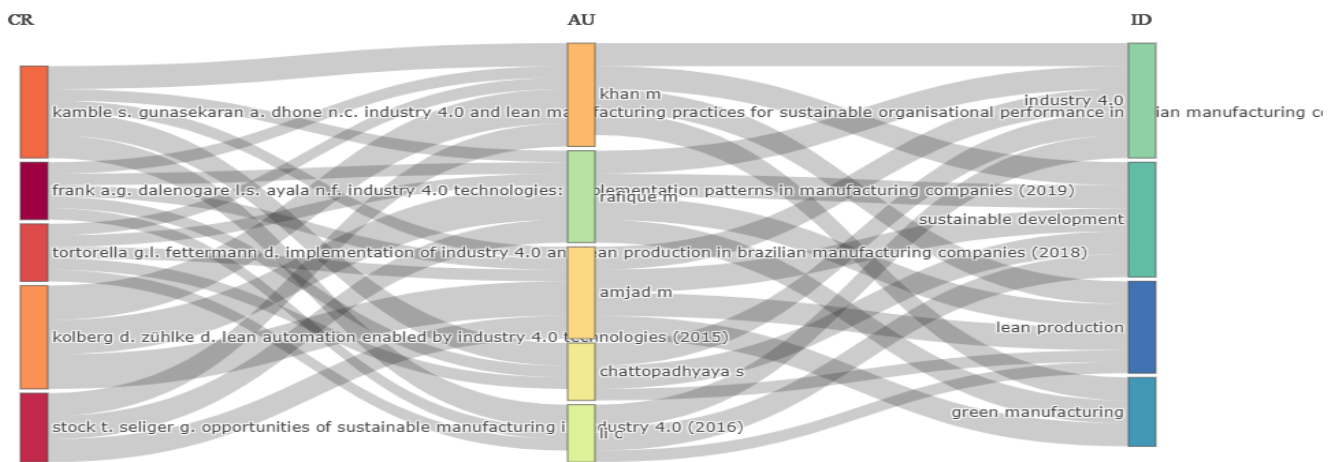
Nota: Realización propia con información de Biblioshiny-Bibliometrix

La Figura 19 presenta el proceso de producción científico tomado como insumo las referencias (columna izquierda) denominadas “CR”, las cuales son utilizadas en los documentos por los autores (columna el centro) “AU” los cuales realizan aportes en diversas temáticas representadas con las palabras claves (columna derecha)

“ID”, en donde Khan m realizo aportes en las temáticas entorno de la IN4, desarrollo sostenible y L&G soportado en los trabajos de:

S. Kamble et al. (2020), Frank et al. (2019), Tortorella & Fettermann. (2018), Kolberg & Zühlke. (2015) y Stock & Seliger. (2016).

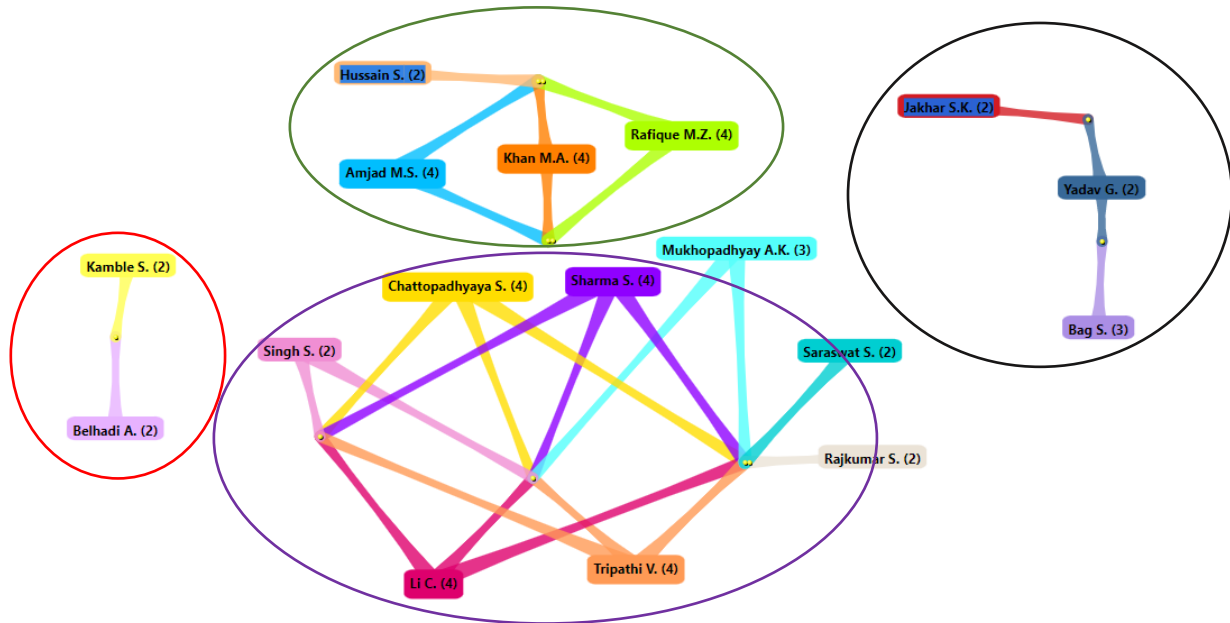
Figura 19. Relación referencias, autores y palabras claves



Nota: Realización propia en Biblioshiny-Bibliometrix

Analizando las redes de investigación que realizan los autores con el objetivo de aportar con las temáticas ya mencionadas, de acuerdo con el análisis de asociación entre investigadores se estableció 4 redes de investigación (Círculos rojo, negro, verde y morado), los autores estudiados anteriormente: Khan M, RafiqueM y Amjad pertenecen a la red de color verde; Chattopadahyaya S y Li C trabajan en asociación en la red número cuatro, siendo esta última la más fuerte al vincular ocho investigadores (Figura 20).

Figura 20. *Redes sociales de investigación*

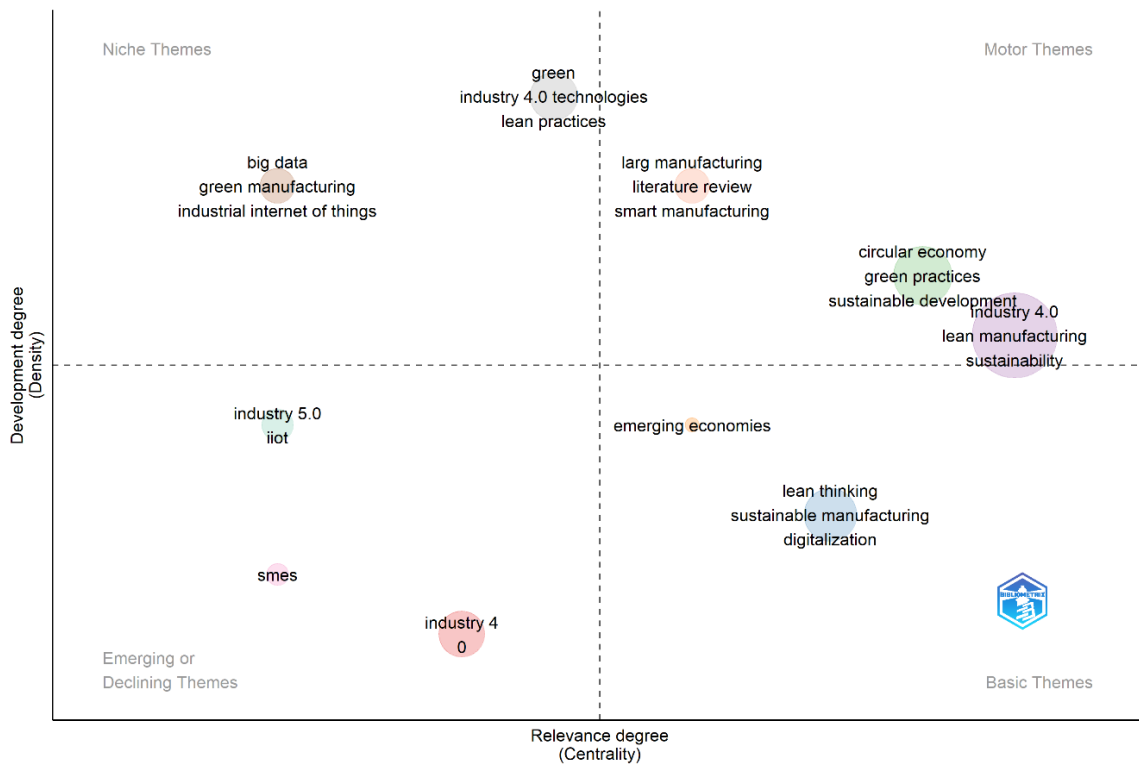


Nota: Realización propia en Vantage Point

La figura 21 presenta el mapa temático relacionado con las palabras claves, en donde se puede observar que en el cuadrante de temas básicos los temas abordados son el pensamiento Lean, junto con la manufactura sostenible y la digitalización, en las sección de temas emergentes está en avance la industria 5.0 y IoT, seguidamente en el sector de temas nichos, las investigaciones se centran en IoT enfocado en la industria, manufactura verde y BD, los tópicos de Lean con industria 4.0 están a punto de pasar a un tema motor, no obstante las investigaciones relacionadas con prácticas Green, economía circular, y desarrollo sostenible se encuentran vinculadas en un mismo grupo muy cercano de IN4, Lean y sostenibilidad, todas estos temas de investigación al encontrarse en esta clasificación son tendencia actual científica.

La Figura 22 ilustra el análisis de palabras claves representado en el diagrama de nube, en donde el tamaño del vocablo representa la importancia en la temática, de acuerdo con los registros presentados entre paréntesis en su respectivo orden son Industria 4.0 (35), desarrollo sostenible con (28) y en tercer lugar L&G (14).

Figura 21. Mapa temático de investigación

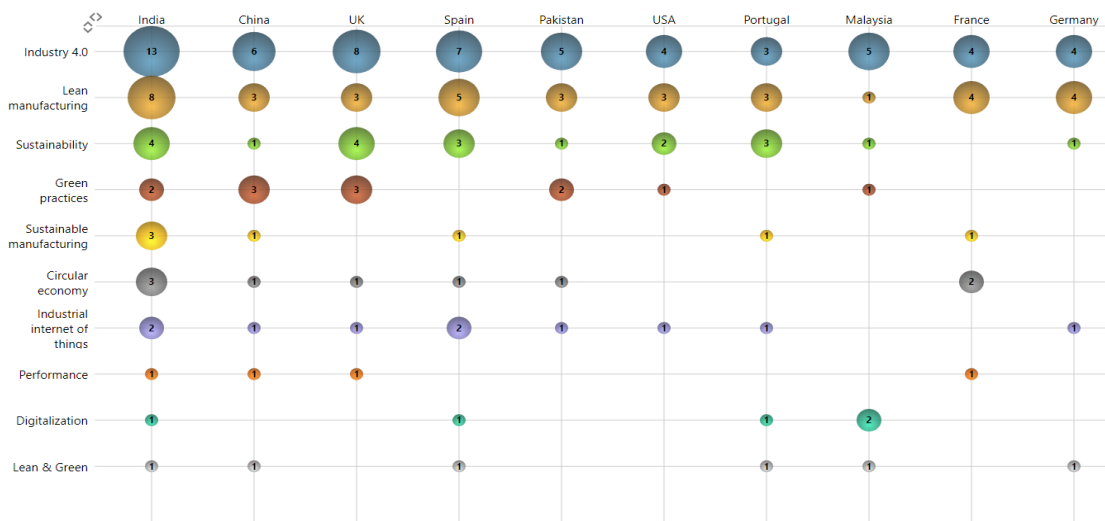


Nota: Realización propia en Biblioshiny-Bibliometrix

La figura 23, muestra la relación entre palabras claves con la variable tiempo, se puede observar que los primeros estudios abordaron los tópicos de IN4 con Lean, en el año 2018, a partir del año 2018 se vinculan temas relacionados con IN4, L&G, sostenibilidad, desempeño entre otros.

Además, estas relevantes palabras claves son estudiadas con mayor frecuencia en la India donde la mayoría de los trabajos de acuerdo con el número de registros se relacionan con IN4 (13), Lean (8), Sostenibilidad (4), sin embargo, las temáticas menos investigadas por los países son las relacionadas con desempeño y L&G (1) (Figura 24).

Figura 24. Relación palabras claves y países

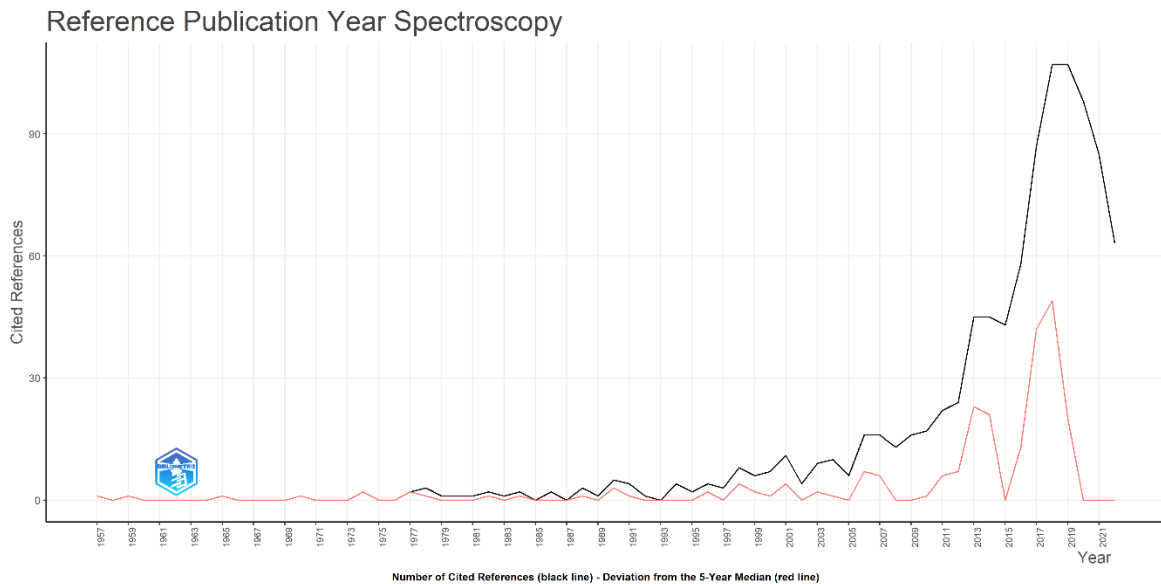


Nota: Realización propia en Vantage Point

La figura 25 presenta el análisis de co-ocurrencia de las palabras claves en donde el tamaño del nodo representa la importancia, siendo las más representativas de acuerdo con sus registros entre paréntesis IN4 (149), Lean (104), sostenibilidad (60), Green (45) y desempeño (34). En lo correspondiente con su relación entre menos distancias de los nodos mayor es el vínculo, se puede observar mayor cercanía entre la IN4, Lean y la sostenibilidad. También el gráfico de densidad (Figura 26) de acuerdo con la intensidad del color rojo,

La figura 28 presenta el análisis espectroscópico de las referencias citadas, (línea negra) junto con la desviación de los 5 años de la mediana (Línea roja), iniciando la referenciación en el año 1957 con el trabajo de (Selznick, 1957), enfocado a las estrategias del liderazgo en administración, no obstante en el año 2018, se presenta un máximo histórico en citaciones de 107 y una desviación con respecto a la mediana de 49 puntos generando cambio, siendo el trabajo de más citación con tres registros el de Buer et al. (2018), en donde los autores plantearon la futura agenda de investigación entorno de la IN4 con Lean y sus puntos de encuentro en capacidades de control, la productividad y flexibilidad, señalando las futuras investigaciones relacionadas con, los efectos de IN4 en Lean, los facilitadores de Lean hacia la implementación de IN4, estudios empíricos que analicen el rendimiento de la IN4, Lean y sus efectos al medio ambiente, finalmente el diseño de un marco que integren la IN4 junto con Lean.

Figura 28. *Espectroscopía de las referencias*



Nota: Realización propia en Biblioshiny-Bibliometrix

A partir del análisis de las investigaciones por medio de la RSL, se identificó un conjunto de tecnologías, prácticas L&G y métricas de DS, metodologías utilizadas por los 68 autores (tabla 6). En la tabla del anexo 1 se presenta el listado de los acrónimos de los métodos, tecnologías de la IN4 prácticas L&G y métricas de DS.

Tabla 6. Aportes de los 68 autores

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Alves. (2022)	RSL	De acuerdo con la experiencia empírica de los investigadores, Lean soporta, la transformación de la IN4, a la industria 5.0.	X	X			X
Amjad et al. (2020)	RSL	Cuando se conjugan L&G con prácticas resiliencia y ágiles integradas con IN4, proporciona una mejora el desempeño económico/operativo y ambiental al disminuir los desperdicios, generar procesos más rápidos y eficientes al mejorar la respuesta a las interrupciones.	X	X	X	X	
Amjad et al. (2021)	EDC	Diseñaron un marco integrado que relaciona IN4 y L&G, en donde la IN4 mejora los desempeños operativos y ambientales en la fabricación.	X	X	X	X	
Amjad et al. (2021)	RSL	Diseñaron un marco para integrar L&G con las prácticas ágiles y resilientes apoyadas por IN4, con el propósito de lograr procesos rápidos, productivos, amigables con el medio ambiente disminuyendo los desperdicios y la incertidumbre.	X	X	X	X	
Awad et al. (2022)	AFE-AFC	Demostraron la relación positiva entre Lean y el pilar económico operativo, respaldado por la IN4 que permite la flexibilidad en la producción.	X	X			
Bag et al. (2023)	SEM	Al implementar L&G basadas en análisis de datos en las empresas fortalecen la confianza entre los accionistas mejorando la imagen empresarial y la sostenibilidad de la cadena de suministro	X	X	X		X
Bag et al. (2021)	SEM	Por medio de las ecuaciones estructurales probaron un modelo teórico que relaciona los factores claves para la implementación de la IN4, que permiten el desarrollo tecnológico y su influencia en la producción limpia y la economía circular.		X		X	
Benešová et al. (2021)	MM	Elaboraron un modelo de entrenamiento para la implementación de la IN4, con atributos ambientales, diagnosticando las barreras que surgen en el desarrollo del modelo.		X		X	X
Benkhati et al. (2022)	SEM	Estudiaron la relación entre las prácticas de fabricación sostenibles, resilientes y Lean, investigando el efecto moderador de la manufactura sostenible en Lean		X		X	

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Bhagat et al. (2022)	SEM	Diseñaron un modelo SEM, en donde los resultados afirmaron que el BD no influye en el desempeño de la empresa, sin embargo, impacta en las prácticas Green.		X	X	X	
Bianco et al. (2023)	MEI	Estudiaron la relación entre los líderes Lean y los de la IN4, en donde las competencias del primer grupo pueden apoyar, las competencias a desarrollar por los gestores de la IN4.	X		X		
Bortolini et al. (2022)	EDC	Aplicaron un modelaje de programación lineal teniendo en cuenta tres objetivos en el mediano plazo, con el propósito de disminuir paralelamente, residuos, emisiones y costos.	X		X	X	
Castiglione et al. (2022)	MEIO	Propusieron un método que permite crear valor al eliminar los desperdicios en transporte e inventarios mejorando paralelamente los desempeños económicos/operativos y ambientales al recopilar y analizar los datos.	X		X	X	
Ciliberto et al. (2021)	RSL	Estudiaron la relación entre L&G y las IN4, en donde la integración entre tecnologías y prácticas mejora la calidad y productividad, haciendo los procesos más sencillos en la fábrica.	X	X	X		
D. Yu & Ye. (2022)	B	Encontraron dos opciones para mejorar el desempeño de la cadena de suministros la primera era la combinación entera IN4 con L&G y finalmente el conjunto de IN4 con Lean y prácticas ágiles.	X	X	X	X	
Dahmani et al. (2021)	RSL	Diseñaron un marco conceptual para la implementación simultánea de L&G y IN4, con el objetivo de fábricas y diseñar productos sin contaminar, logrando el bienestar del cliente.	X	X	X	X	
Darwish et al. (2021)	ARMPS	Propusieron un algoritmo en tiempo real utilizando IoT para la impresión en 3D personalizada, distribuyendo equitativamente las asignaciones en las impresoras mejorando la gestión energética.		X		X	
De Giovanni & Cariola. (2021)	SEM	Estudiaron la influencia de la innovación de procesos mediante la IN4 sobre L&G, los resultados presentan que la relación con proveedores soportada en Lean mejora la colaboración en programas ecológicos aumentando el desempeño ambiental y operativo.	X	X	X	X	
Despeisse et al. (2022)	RSL	Los resultados determinaron, la importancia de integrar los objetivos de desarrollo sostenible con los industriales, además; propusieron un marco para guiar las futuras investigaciones en los problemas ambientales específicos que se presentan en la fabricación		X	X		
Ding et al. (2021)	RSL	La IN4 posibilita, la relación entre Lean y las prácticas ágiles, solventando los equilibrios entre las metas competitivas.	X		X		
Dixit et al. (2022)	SEM	Investigaron como L&G mediado por la innovación en las capacidades influencia la IN4, probando la relación entre positiva entre L&G y la implementación de IN4.	X	X	X	X	
Fallahpour et al. (2021)	FUZ	Propusieron un método para reconocer las variables de evaluación más relevantes para diagnosticar a los		X	X	X	

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Florescu & Barabas. (2022)	RSL	proveedores sobre la eficiencia ambiental, operativa y tecnológicos en la gestión de adquisición. Cuando se conecta, tecnologías específicas de la IN4 como el gemelo digital y la simulación con Lean y la fabricación flexible, permite reconfiguración y adaptabilidad mejorando los procesos productivos.	X	X			
Fraga-Lamas et al. (2021)	EDC	Estudiaron la arquitectura de las comunicaciones basadas en IA y Green IoT, en el costo del sistema depende del espacio geográfico, países con energía más económica, produce más emisiones, caso contrario en países con mayor fortaleza en inversiones de energía renovable.		X	X	X	
Ghadge et al. (2022)	ISM MICMAC- SEM	Evaluaron la relación entre la IN4, Green y el desempeño de la cadena de suministro, existiendo relación indirecta entre la IN4 mediado por Green en el desempeño, siendo más fuerte la relación directa entre IN4, Green en el desempeño.		X	X	X	
Ghaithan et al. (2021)	SEM	Presentaron un conjunto de constructos para el aporte de la IN4 a Lean y el cuidado ecológico como un pilar del DS, para mejorando simultáneamente el desempeño.	X	X	X	X	
Ghobakhloo & Fathi. (2019)	EDC	Para realizar el proceso de cambio hacia la IN4, es importante la integración empresarial apoyadas en tecnologías de la información, no obstante, para los pequeños empresarios pueden iniciar, por las áreas principales en la operación, respaldando las estrategias principales empresariales.	X	X			
Groten & Gallego-García. (2021)	EDC	Diseñaron un modelo conceptual secuencial, entre IN4 y Lean para analizar el impacto en los sistemas productivos, en donde las fases del modelo mejoran los indicadores claves de gestión económica y operativa.	X	X			
Gupta et al. (2018)	SEM	La incorporación de diseño de procesos, productos, personalización la operacionalización, distribuciones sostenibles, junto con las prácticas Lean, ágil son la ruta para la manufactura limpia.	X	X	X		
J. Lu et al. (2020)	SEM	Investigaron la mediación y moderación de la innovación y la imagen corporativa entre el desempeño organizacional y los pilares de la pirámide de Carroll, los resultados sustentaron, la implementación de la producción limpia, economía circular y la IN4, presenta una ventaja comercial para las PYMES relacionada con el apoyo para el desarrollo sostenible.		X	X	X	
John et al. (2021)	RSL	Reconocieron y describieron los facilitadores de la implementación de L&G en un marco de IN4, superando las barreras de adopción de las prácticas en conexión con el DS.	X	X	X	X	X
Joshi et al. (2022)	MEI	Identificaron las principales barreras entre la IN4 y Lean como: La tolerancia a los problemas presentados en la adopción, la escasa estandarización, entendimiento y soporte capacitado.	X	X			

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Kunkera et al. (2022)	EDC	Implementaron el VSM, priorizando los tiempos de espera en las comunicaciones internas y externas, aumentando las ventas, utilidades, productividad, disminuyendo los costos.	X		X		
Leong et al. (2020)	EDC	Presentaron un modelo L&G automatizado con aprendizaje automático en donde el análisis de datos permite dar un punto de comparación a los operadores sobre el desempeño sobre las áreas sensibles en la producción.	X	X	X		
Lugert et al. (2018)	ENM	Se destaca la importancia de la combinación del VSM con la IN4, en donde la implementación de la digitalización puede contrarrestar las deficiencias del VSM.	X		X		
Nascimento et al. (2022)	GF	Esquematizaron un modelo, en donde integraron la IN4 con Lean y la economía circular, generando una guía que permite integrar el VSM con IN4, para incentivar la circularidad en los procesos de forma continua e incremental.	X	X			
Ojha. (2022)	MUL	Caracterizaron los factores para la integración entre IN4 y Lean entre los cuales los más relevantes son en la excelencia en la fabricación sobre salen el BD, el liderazgo, la mejora continua, y JIT.	X		X		
Park et al (2020)	EDC	Diseñaron un flujo de energía física cibernética, para mejorar la eficacia energética, utilizando el BD capturados por IoT, evitando realizar inversiones ociosas en maquinarias.		X		X	
Paula Pinheiro et al. (2022)	SEM	Por medio del diseño de un modelo SEM analizaron la relación entre la presión ejercida por los grupos de interés la IN4 y el ecodiseño y el impacto en el desempeño económico y ambiental. Los hallazgos presentan tecnologías como la IA y el BD, apoyan al ecodiseño y las presiones ejercidas ayudan con la implementación de las prácticas.		X	X	X	
Pei et al. (2021)	RSL	Brindaron una caracterización de las áreas relacionadas con la producción limpia, donde destacan como futura línea de investigación entre la manufactura aditiva y IoT como soporte al proceso de fabricación ecológico.		X		X	
Qu et al. (2019)	EDC	Diseñaron, un marco integrado para cerrar la brecha entre los procesos de reingeniería, Lean, y la fabricación inteligente.	X			X	
R. Kumar et al. (2022)	FUZ	Identificaron los impulsores, del desempeño social relacionadas con la IN4, siendo las más influyentes, las prácticas Green, la preparación para la incertidumbre en la pandemia, la ergonomía, salud en el trabajo junto con la IN4, mejoran el desempeño social.		X	X	X	X
Rahardjo et al. (2023)	EDC	Plantearon un sistema, en donde vincularon la fabricación inteligente y sostenible, mejorando el desempeño en producción, ahorrando costos, finalmente optimizaron la empleabilidad de los operarios.	X		X		

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Raut et al. (2019)	SEM-IA	El BD tiene influencia positiva en prácticas de DS, siendo las más relevantes, el liderazgo, las políticas públicas del gobierno central, la relación con proveedores y clientes, y las estrategias comerciales.	X	X	X	X	X
Rehman Khan et al. (2022)	SEM	Analizaron el impacto del block-chain, en la economía circular para mejorar el desempeño empresarial, siendo positiva la relación entre las tecnologías y las prácticas, igualmente la economía circular tiene una influencia positiva en los pilares económicos y ambientales		X	X	X	X
Reyes et al. (2021)	MCP	Determinaron el vínculo entre las prácticas Lean, agile y sostenible, para mejorar el rendimiento de la cadena de suministro por medio de tecnologías de la IN4.	X		X		
Richnák & Fidlerová. (2022)	E	Demostraron el vínculo entre la logística inversa y tecnologías relacionadas con la IN4 como RC, BD, energías renovables, materiales avanzados IoT, y las TICS.		X		X	
Rosin et al. (2020)	RSL	La IN4, puede respaldar a prácticas de Lean como JIT, JIDOKA, no obstante, su efectividad se reduce para la eliminación de desperdicios y el trabajo en equipo	X		X		
S. Kamble et al. (2020)	SEM	Identificaron el efecto mediador de Lean entre la IN4 y el DS, por otro lado, existe una relación positiva directa entre IN4 y el DS.	X		X	X	X
S. Sadiq et al. (2021)	EDC	Integraron metodológicamente, las prácticas Lean con la estrategia del océano azul, permitiendo la producción de alta calidad, disminuyendo los tiempos de producción costos.	X		X	X	
Santos et al. (2019)	EDC	Al implementar tecnologías de la IN4 junto con prácticas L&G se pueden mejorar simultáneamente, los desempeño operacionales y ambientales	X	X	X	X	
Sinha & Matharu. (2019)	RSL	Las investigaciones alrededor de Lean están concentrado en países de origen asiático, al principio las investigaciones estaban siendo realizadas por países desarrollados, actualmente los estudios también se enfocan en economías emergentes, por otro lado, existe una inclinación de las investigaciones en relacionar Lean con IN4 y DS.	X		X	X	X
Slim et al. (2021)	EDC	Elaboraron un método analizando las capacidades de las herramientas Lean, para integrarlas al diseño de fabricación en el marco de IN4.	X		X		
Tantscher & Mayer. (2022)	EDC	Propusieron un marco de integración entre, el enfoque de la estrategia digital, la interdisciplinariedad, el cambio y las prácticas Lean, impactando la sostenibilidad de las compañías.	X		X		
Tripathi et al. (2022)	EDC	Diseñaron un método que integra la manufactura inteligente, Lean para para apoyar los objetivos del sistema de gestión en el taller con el fin de mejorar el desempeño económico, operacional, incrementado la producción en 33%.	X		X		
Tripathi et al. (2021)	EDC	Diseñaron un enfoque innovador entre las prácticas ágil, Lean y IN4, permitiendo un sistema empresarial	X		X	X	X

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Tripathi et al. (2022)	EDC	sostenible, disminuyendo los desperdicios en el taller de fabrica Diseñaron un sistema de tomas de decisiones, vinculando los procesos de producción inteligente con Lean, logrando la optimización de los procesos y disminuyendo los desperdicios y tiempo de inactividad.	X	X			X
Tripathiet al. (2022)	EDC	Desarrollaron un sistema vinculando la producción inteligente para detectar los problemas en el taller de producción, impactando el desempeño positivamente en la mejora de los tiempos de producción, el aporte de los operarios, la utilización de la maquinaria y la excelencia operativa y financiera.	X	X			X
Tseng et al. (2021)	B	Identificaron ocho campos de estudio de la ingeniería industrial relacionada con la sostenibilidad los cuales son: Lean relacionado con IN4, comunicaciones inteligentes soportadas en BD, seguridad y protección, IA enfocada en la sostenibilidad, economía circula con IN4, inteligencia de negocios y RA, y la sostenibilidad ambiental.	X	X			X
Umar et al. (2022)	SEM	Estudiaron el efecto de la IN4, en las prácticas Green en economías emergentes existiendo influencia positiva entre la IN4, la fabricación y logística ecológica mejorando el DS.		X	X	X	X
Varela et al. (2019)	SEM	Por medio de un modelo SEM determinaron que, no es determinante, que Lean, este relacionado con los pilares, de la sostenibilidad, como si lo está la IN4.	X		X	X	X
Villalba-Diez et al. (2020)	AGP	Por medio de modelos geométricos de análisis profundo de datos Lean con el propósito de mejorar el DS.					
W. Yu et al. (2020)	SEM	Estudiaron la mediación entre la innovación y el DS por medio de Lean, en donde la innovación afecta indirectamente al DS por medio de Lean.	X		X	X	X
Wang et al. (2021)	ECON	Analizaron el impacto de la innovación tecnológica relacionado con el desarrollo verde, económico, la globalización, la inversión en I+D y el capital humano. Los resultados demuestran que la innovación tecnológica tiene una relación positiva con el desarrollo verde.		X	X	X	X
Y. Yu et al (2021)	SEM	Identificaron la relación positiva entre la transformación digital de la IN4, el capital relacional de la cadena de suministro impacta positivamente el desempeño financiero de las empresas.	X	X	X	X	
Yadav et al. (2ª20a)	BWM - ELECTRE)	Desarrollaron un marco para superar las barreras de la sostenibilidad en la cadena de suministro, por medio de IN4 y la economía circular, además; identificaron un conjunto 28 barreras y 22 soluciones.		X	X		
Zekhnini et al. (2021)	B	Identificaron el impacto de IN4 en L&G y el desempeño sostenible de la cadena de suministro, diseño un modelo de hoja de ruta para la integración de las tecnologías con las prácticas para mejorar el DS.	X	X	X	X	X

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
Zhu et al. (2022)	Fuz AHP-DEMATEL-ISM	Propusieron un modelo donde investigaron los catalizadores, en el marco de la IN4 de L&G, desde la perspectiva de las partes interesadas, como propósito de alcanzar el DS.	X	X	X	X	X

Nota: creación propia L= Lean, G= Green; E= Económico/Operativo, A= Ambiental, S= Social

Como estrategia de verificación de la brecha en el conocimiento, se desarrolló un análisis multivariado para identificar posibles relaciones de acuerdo con la literatura, para esto se codificaron las variables de la siguiente forma (tabla 7), el valor de cero corresponde con la no implementación de alguna práctica L&G o métrica de DS, los valores de 1, 2, significa artículos que estudiaron la IN4 con Lean /o Green, los numerales 3, 4 y 5 corresponden a documentos que mencionaron como mínimo una de las métricas de DS, el valor de 3 se asignó al pilar económico, 4 para el ambiental y finalmente 5 para el social.

Tabla 7. Análisis multivariado

Número	Autor(es)	L	G	E	A	S
1	Alves. (2022)	1	0	3	0	5
2	Amjad et al. (2020)	1	2	3	4	0
3	Amjad et al. (2021)	1	2	3	4	0
4	Amjad et al. (2021)	1	2	3	4	0
5	Awad et al. (2022)	1	0	3	0	0
6	Bag et al. (2023)	1	2	3	0	5
7	Bag et al. (2021)	0	2	0	4	0
8	Benešová et al. (2021)	0	2	0	4	5
9	Benkhati et al. (2022)	0	2	0	4	0
10	Bhagat et al. (2022)	0	2	3	4	0
11	Bianco et al. (2023)	1	0	3	0	0
12	Bortolini et al. (2022)	1	0	3	4	0

Número	Autor(es)	L	G	E	A	S
13	Castiglione et al. (2022)	1	0	3	4	0
14	Ciliberto et al. (2021)	1	2	3	0	0
15	D. Yu & Ye. (2022)	1	2	3	4	0
16	Dahmani et al. (2021)	1	2	3	4	0
17	Darwish et al. (2021)	0	2	0	4	0
18	De Giovanni & Cariola. (2021)	1	2	3	4	0
19	Despeisse et al. (2022)	0	2	3	0	0
20	Ding et al. (2021)	1	0	3	0	0
21	Dixit et al. (2022)	1	2	3	4	0
22	Fallahpour et al. (2021)	0	2	3	4	0
23	Florescu & Barabas. (2022)	1	0	3	0	0
24	Fraga-Lamas et al. (2021)	0	2	3	4	0
25	Ghadge et al. (2022)	0	2	3	4	0
26	Ghaithan et al. (2021)	1	0	3	4	5
27	Ghobakhloo & Fathi. (2019)	1	0	3	0	0
28	Groten & Gallego-García. (2021)	1	0	3	0	0
29	Gupta et al. (2018)	1	2	3	0	0
30	J. Lu et al. (2020)	0	2	3	4	0
31	John et al. (2021)	1	2	3	4	5
32	Joshi et al. (2022)	1	0	3	0	0
33	Kunkera et al. (2022)	1	0	3	0	0
34	Leong et al. (2020)	1	2	3	0	0
35	Lugert et al. (2018)	1	0	3	0	0
36	Nascimento et al. (2022)	1	2	0	0	0
37	Ojha. (2022)	1	0	3	0	0
38	Park et al (2020)	0	2	0	4	0

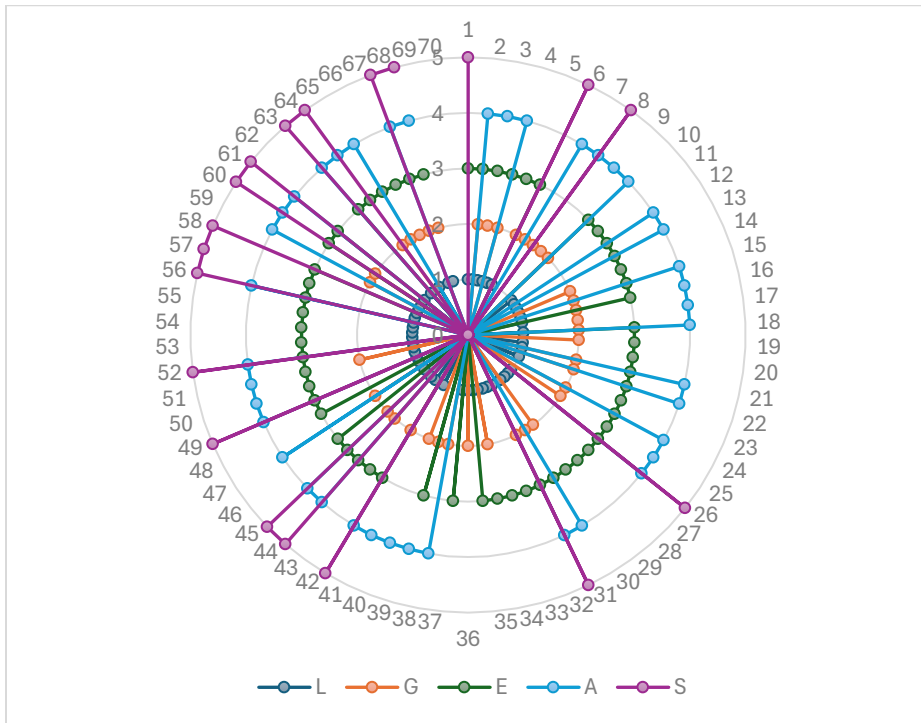
Número	Autor(es)	L	G	E	A	S
39	Paula Pinheiro et al. (2022)	0	2	3	4	0
40	Pei et al. (2021)	0	2	0	4	0
41	Qu et al. (2019)	1	0	0	4	0
42	R. Kumar et al. (2022)	0	2	3	4	5
43	Rahardjo et al. (2023)	1	0	3	0	0
44	Raut et al. (2019)	1	2	3	4	5
45	Rehman Khan et al. (2022)	0	2	3	4	5
46	Reyes et al. (2021)	1	0	3	0	0
47	Richnák & Fidlerová. (2022)	0	2	0	4	0
48	Rosin et al. (2020)	1	0	3	0	0
49	S. Kamble et al. (2020)	1	0	3	4	5
50	S. Sadiq et al. (2021)	1	0	3	4	0
51	Santos et al. (2019)	1	2	3	4	0
52	Sinha & Matharu. (2019)	1	0	3	4	5
53	Slim et al. (2021)	1	0	3	0	0
54	Tantscher & Mayer. (2022)	1	0	3	0	0
55	Tripathi et al. (2022)	1	0	3	0	0
56	Tripathi et al. (2021)	1	0	3	4	5
57	Tripathi et al. (2022)	1	0	3	0	5
58	Tripathiet al. (2022)	1	0	3	0	5
59	Tseng et al. (2021)	1	2	0	4	0
60	Umar et al. (2022)	0	2	3	4	5
61	Varela et al. (2019)	1	0	3	4	5
62	Villalba-Diez et al. (2020)	0	0	0	0	0
63	W. Yu et al. (2020)	1	0	3	4	5

Número	Autor(es)	L	G	E	A	S
64	Wang et al. (2021)	0	2	3	4	5
65	Y. Yu et al (2021)	1	2	3	4	0
66	Yadav et al. (2ª20a)	0	2	3	0	0
67	Zekhnini et al. (2021)	1	2	3	4	5
68	Zhu et al. (2022)	1	2	3	4	5

Nota: creación propia L= Lean, G= Green; E= Económico/Operativo, A= Ambiental, S= Social

Para el análisis de los datos se realizó por medio del diseño de la figura de radar (Figura 29), que permitió identificar la relación entre las variables, entre mayor sea la cercanía de la circunferencia con el centro de la figura significa mayor vínculo con la IN4, por tanto, un primer hallazgo es la concentración de estudio con Lean 49 documentos fueron identificados; seguido de Green con 39, círculos azul y amarillo. Un segundo hallazgo es el análisis del efecto de la IN4, L&G en su mayoría en la dimensión económica (línea verde) con 58 artículos seguida de la ambiental (línea celeste), con 42, la dimensión social se encuentra a una fase de exploración con 20 documento (línea morada). Un tercer hallazgo resultante del análisis de la intersección de las líneas es la identificación de solo dos documentos que abordaron la IN4 junto con L&G y el DS, el primero clasificado con el punto 31 es una RSL realizada por John et al. (2021) y el punto 44 del autor Raut et al. (2019) utilizó un enfoque híbrido de SEM y de redes neuronales artificiales en donde estudió la relación específica del BD con L&G y otro conjunto de variables con impacto en el DS. Lo anterior ratifica la importancia de esta investigación al no existir estudios científicos que aborden específicamente la IN4 junto con L&G y el impacto en el DS aplicando estadística multivariada enfocada en SEM.

Figura 29. Análisis de radar



Nota: creación propia L= Lean, G= Green; E= Económico/Operativo, A= Ambiental, S= Social

2.4 Discusión

El planteamiento de la discusión es abordado desde cuatro temas centrales en primer lugar, se presenta la definición del modelo L&G 4.0, luego se considera los diferentes estudios encontrados que han abordado los tópicos de investigación, seguidamente se expone los diversos métodos aplicados en los documentos analizados. Finalmente se expone de forma gráfica el listado de las principales tecnologías prácticas L&G y métricas de desempeño sostenible.

Igualmente, aportando a las definiciones ya existentes, se puede denominar la integración de IN4 con L&G como un modelo L&G 4.0 sostenible, el cual utiliza,

tecnología con el objetivo de maximizar y conectar las prácticas L&G con el objetivo de disminuir los desperdicios ambientales e industriales generando valor en el cliente además de eficiencia y eficacia en los recursos impactando positivamente el DS. Por otro lado, solo el estudio realizado por Zekhnini et al. (2021) utilizando el análisis bibliométrico combinado con la RSL, proporcionó un modelo que integra L&G en la cadena de suministro digital para el desempeño sostenible se aproximó a esta RSL.

Sin embargo, esta investigación no relacionó la IN4 con L&G el impacto en el desempeño. Además, se identificó un estudio que relaciono tecnologías específicas de la IN4 como el BD con siete prácticas como: administración y liderazgo, L&G, administración de la calidad, integración con el cliente, integración el proveedor procesos internos de negocios, las políticas centrales del gobierno, y sus efectos con el DS realizado por Raut, Mangla, et al. (2019) aplicando el método SEM. No obstante, los autores analizaron a L&G junto con otro conjunto de prácticas y como estas variables aportan a BD impactando en el DS. Por consiguiente, esta RSL ratifica la importancia de la tesis doctoral en el diseño de un modelo SEM que permita conocer las tecnologías asociadas con la IN4 que probablemente tienen relación positiva con L&G y que aportan al DS en el sector manufacturero en Santander. De acuerdo con los resultados de la RSL lo anterior no se ha realizado.

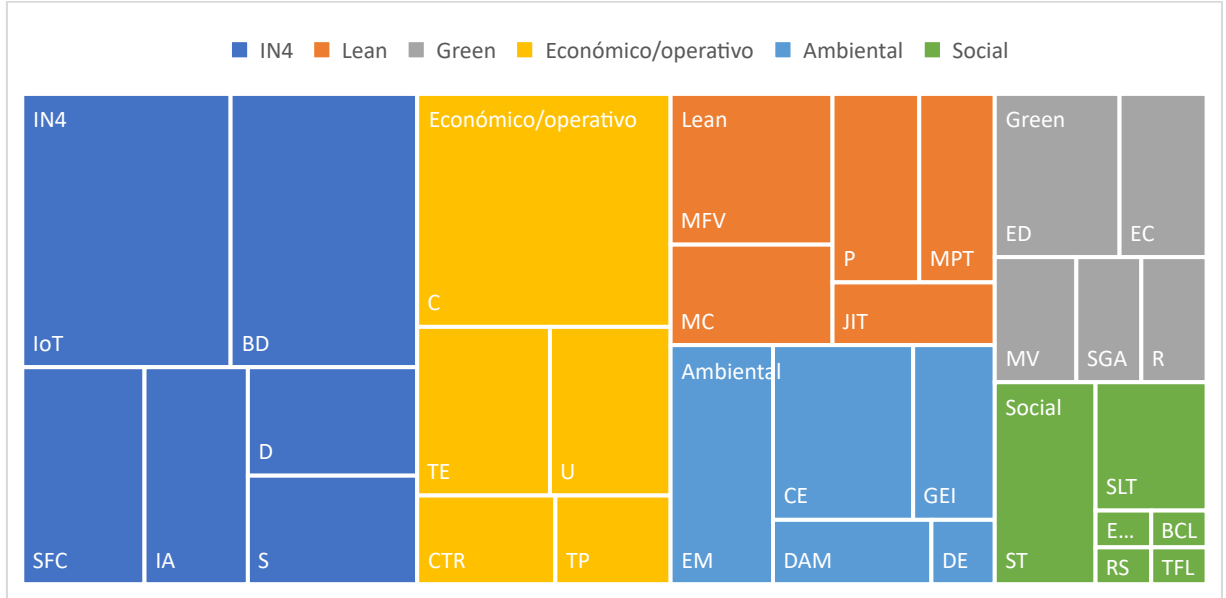
En la RSL identificaron 17 de artículos que aplican el método de estudio de caso, equivalentes al 31% del total de los documentos analizados, siendo este método el más utilizado por los investigadores, seguidamente 12 estudios aplicaron RSL, cifra

similar se presentó en las investigaciones que utilizaron la estadística multivariada aplicando SEM, estos distintos enfoques participaron con un 22% respectivamente en el total de documentos analizados.

En resumen, estas tres diferentes metodologías representan el 75% de las investigaciones identificadas en 41 documentos. Además, se registraron 33 tecnologías asociadas con la IN4, 60 prácticas L&G, 31 métricas de desempeño económico/operativo, 13 indicadores ambientales y 7 sociales. Lo anterior evidencia la falta de más estudios que aborden la relación entre IN4, L&G en los tres pilares del DS. En tercer lugar, se proporciona en forma de figura de rectángulo jerarquizadas de acuerdo con el número de registros presentados en los documentos científicos (Figura 30) un conjunto de tecnologías, prácticas L&G y métricas de DS, tomando como referencia de clasificación las 5 principales, en donde el tamaño del rectángulo representa la importancia del componente en el análisis.

Finalmente, las investigaciones actuales se han enfocado en analizar la IN4 con L&G en el pilar económico/ operativo. Por esto, la importancia de esta RSL y análisis bibliométrico la cual aporte un conjunto de tecnologías y prácticas L&G con relación en el DS, que podrán ser utilizados por la comunidad científica para el diseño de investigaciones con el propósito de probar las posibles relaciones con la aplicación de diversos métodos que podrán fortalecer los hallazgos de los autores.

Figura 30. Principales tecnologías, prácticas Lean & Green y métricas de desempeño sostenible

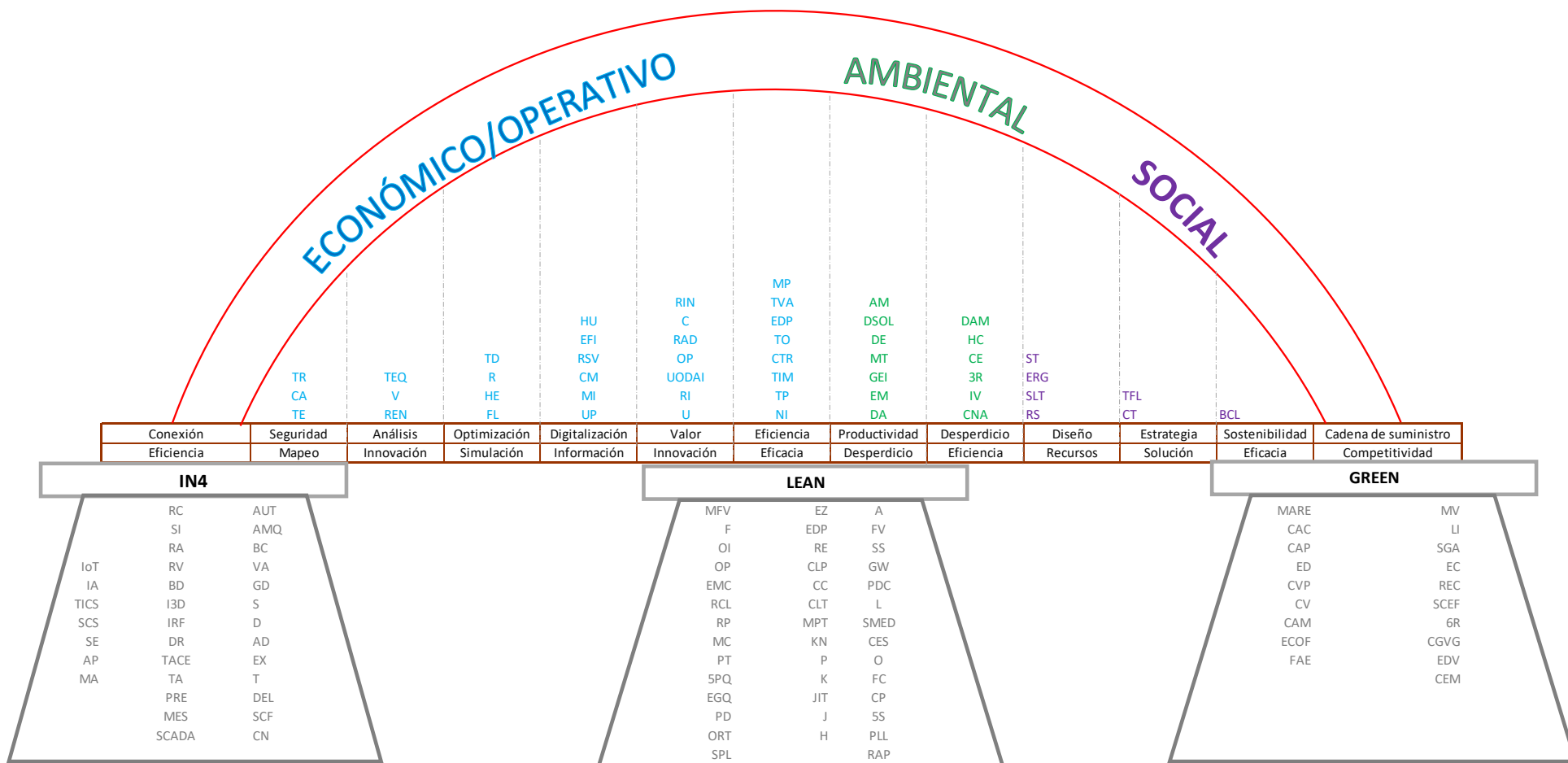


Nota: Creación propia

2.4.1 Diseño del marco conceptual

El objetivo de la RSL fue poder explorar la posible relación entre la IN4 como soporte a L&G y el impacto en DS, sustentado en los documentos identificados anteriormente que relacionan tecnologías, prácticas y métricas de DS. Para este propósito, se llevó a cabo un marco conceptual, sobre dicha relación, el esquema sugerido en la figura 31, presenta los vínculos reconocidos en la literatura científica entre IN4, L&G y métricas de DS, se adopta la figura de puente, al entender desde el concepto arquitectónico como la estructura firme que permite la unión entre varios puntos, así es la relación entre la IN4 con L&G y las diferentes aristas del DS.

Figura 31. Modelo conceptual entre tecnologías Lean & Green y Desempeño sostenible



Nota: Creación propia

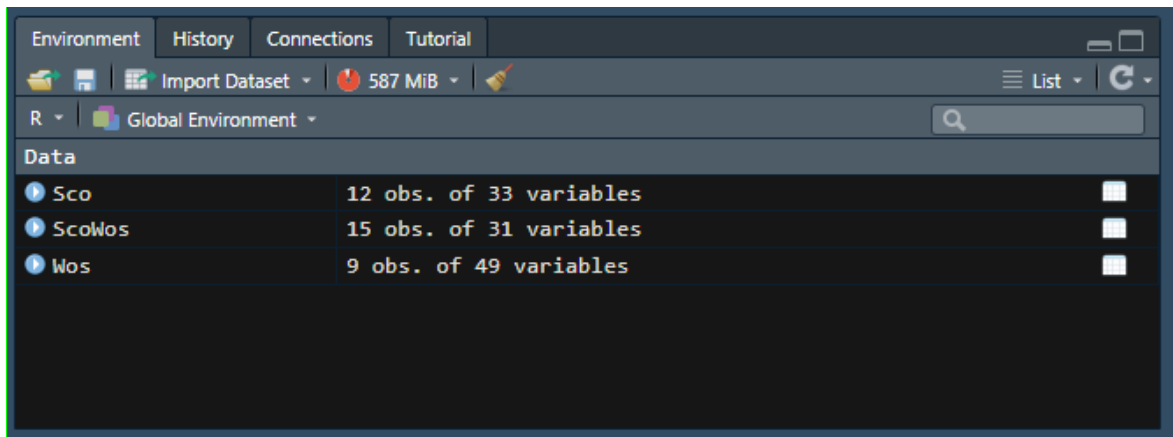
Este marco conceptual ofrece un conjunto de tecnologías que apoyan a L&G junto con sus métricas de DS, como formas de tres pilares de concreto se presentan el grupo de tecnologías y prácticas L&G que soportan el DS. En primer lugar, encontramos el pilar de la IN4 con 33 tecnologías, seguidamente el pilar de Lean está compuesto por 41 prácticas, junto con Green con 19, además, utilizando las palabras claves como bloques de construcción entre los pilares tecnológicos y de las prácticas L&G, y las métricas de DS se seleccionaron 26 palabras claves, que permiten la conexión entre IN4, L&G y DS. También, se presentan un conjunto de métricas de DS, identificadas iniciando en el pilar económico/operativo con 31 en el ambiental 13 y social 7.

Finalmente con el objetivo de actualizar la información, de la RSL, se vinculó información de los años 2023 al 2024, la figura 32 presenta el proceso de minería de datos en el software R studio, en donde se encontraron 12 documentos en la base de datos Scopus y 9 en WoS, para un total de 21, identificándose 6 duplicados (figura 33) para su posterior eliminación con un resultado neto de 15 documentos, los cuales 2 se publicaron en lo corrido del año 2024 y los 13 restantes en el año 2023 (figura 34).

La figura 35 presenta el gráfico de nube de palabras claves el cual permite identificar las temáticas relevantes en investigación, se continua con la tendencia de la IN4 como palabra relevante con 8 registros que equivalen al 11%, es de resaltar que el vocablo L&G aparece relacionado con smart y la palabra paridgma con dos registros. Esta figura es reveladora al exponer el método SEM como uno de los más utilizados por los investigadores. Sin embargo, de los 5 trabajos que

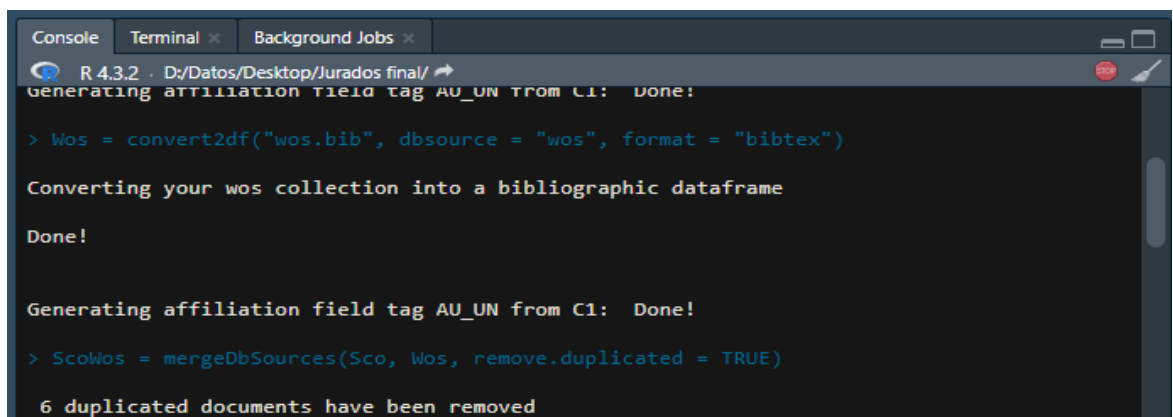
utilizaron este método estadístico multivariado que equivale al 33%, ninguno relaciono a IN4 con L&G y el DS, solo dos estudios abordaron las prácticas L&G el realizado por los investigadores Fontoura et al. (2023); Paraschos et al. (2023) utilizando otros métodos de investigación como el Fuzzy- DEMATEL y el análisis de experimentos (Tabla 8). Por tanto, se corrobora la importancia de este trabajo al no encontrarse evidenciade documento que relacione la IN4, L&G y el DS aplicando un modelo SEM en revistas de alto impacto.

Figura 32. Actualización 2023-2024



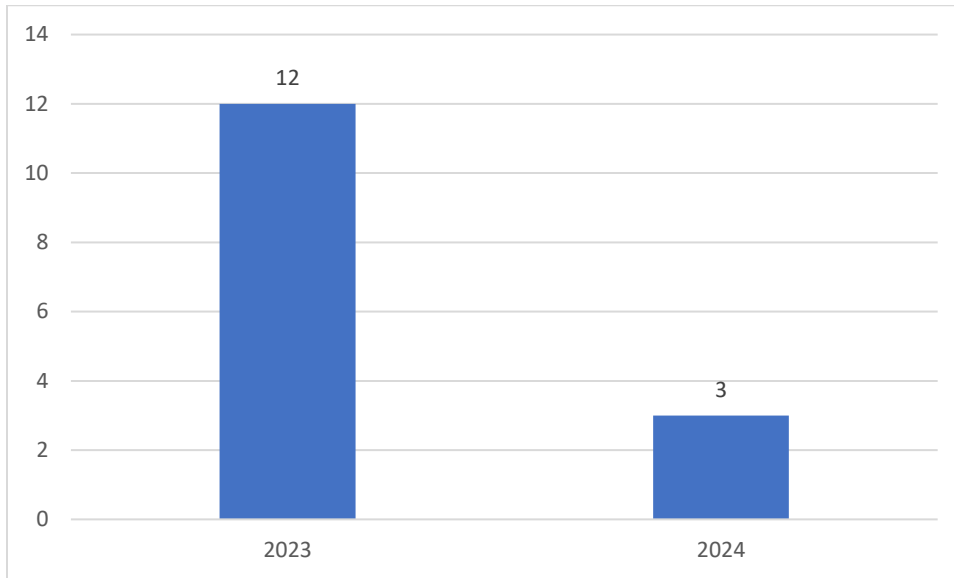
Nota: Realización propia con información de Biblioshiny-Bibliometrix

Figura 33. Duplicados eliminados 2024



Nota: Realización propia con información de Biblioshiny-Bibliometrix

Figura 34. Distribución documental 2023-2024



Nota: Realización propia con información de Biblioshiny-Bibliometrix

Figura 35. Palabras claves 2023-2024



Nota: Realización propia en Biblioshiny-Bibliometrix

Tabla 8. Resumen actualización documentos 2023-2024

Autor(es)	Método	Aporte	L	G	E	A	S
N. Kumar et al. (2024)	RSL	Las investigaciones actuales estudian la integración entre IN4 y Lean por medio de marcos y modelos conceptuales	X	X			
Shahin et al. (2024)	Análisis computacional	Diseñaron un modelo computacional que permite detector paquetes dañados antes del despacho, lo anterior disminuye el desperdicio de reproceso.	X				
Sharma et al. (2024a)	SEM	Existe una mediación entre las prácticas Lean y el desempeño operativo.	X		X		
Arana-Landín et al. (2023)	Análisis de correlación	La implementación de tecnologías como la inteligencia, artificial, impresión 3 D, Big data, analítica de datos, IoT mejoran la eficiencia energética			X		
Benkhati et al. (2023)	SEM	La IN4 apoya las prácticas Lean, ágiles generando mejoras en el desempeño sostenible	X		X	X	X
Bianco et al. (2023b)	ISM-MICMAC	Las competencias que debe tener un líder Lean están muy relacionadas con las que debe tener un líder de la IN4.	X				
Ding et al. (2023)	RSL	La IN4 brinda soporte a las Lean y las prácticas ágiles, disminuyendo los costos y aumentándola flexibilidad.	X		X		
Fiorello et al. (2023)	RSL- Entrevistas	Generaron una estrategia que permite configurar L&G con la gestión tecnológica.	X		X	X	X
Fontoura et al. (2023)	Fuzzy- Demtel	Por medio del mapeo del flujo de energía identificaron las áreas con mayor potencial de ahorro, mejorando el desempeño económico y ambiental.	X	X	X	X	
Karmaker et al. (2023)	SEM	Las tecnologías asociadas con la IN4 tienen un impacto positivo y significativo en el desempeño sostenible.		X	X	X	X
Khan et al. (2023)	SEM	La IN4 afecta positivamente las prácticas verdes y el desempeño ambiental y operativo, además existe una mediación parcial entre la IN4, las prácticas verdes y el desempeño operativo y de innovación verde		X	X		
Paraschos et al. (2023)	Análisis de experimentos.	El aprendizaje automático y L&G, es un sistema inteligente, eficiente y con aporte a la sostenibilidad.	X	X			
Psarommatidis et al. (2023)	Estudio de caso.	Crearon una ontología para el método de cero defectos que permite el procesamiento de lenguaje natural.	X		X		
Ooi et al. (2023)	SEM	Las tecnologías de la IN4 moderan positivamente las 5 dimensiones de Lean y el desempeño sostenible	X		X	X	
Rahardjo et al. (2023b)	Estudio de caso	Cuando la IN4 apoya a las prácticas Lean se genera un sistema de fabricación inteligente que propende por ambientes más seguros de trabajo.	X				X

Nota: Realización propia

3. Metodología de investigación

En este capítulo se abordará el enfoque metodológico que logro cumplir con los objetivos planteados en la tesis doctoral, en el cual se presentaran la línea y tipo de investigación, además de la estructura sistémica conformada por tres fases para el alcance a los tres objetivos específicos propuestos.

3.1 Línea de investigación

Este trabajo de tesis doctoral se realizó de forma conjunta entre la colaboración de las Universidades Santo Tomás y Ean representadas por los grupos de investigación Integración y Globalización de los Negocios (INGLONEG) y el grupo de la EAN dirección y gestión de proyectos enfocados en las líneas de investigación Integración económica y dirección estrategia y competitividad.

3.2 Tipo de investigación

El enfoque metodológico adoptado en este estudio es cuantitativo de alcance explicativo para responder la problemática sobre la implementación de la IN4 como apoyo a L&G y el impacto en el DS. Es de tipo cuantitativo debido a que comprende un grupo de procesos en serie de forma organizada con el fin de comprobar ciertas suposiciones (Ahmad et al., 2019; Sampieri, 2018); siendo la característica más importante de este enfoque de acuerdo con Lerman et al. (2021), el planteamiento de hipótesis, que expresan relaciones funcionales en tres variables aplicando técnicas estadísticas organizadas con el fin de procesar la información.

Asimismo, es de naturaleza explicativa al tener como fin interpretar la ocurrencia de un fenómeno en particular, su relación entendiendo el comportamiento de las variables (Ferreyro & Longhi, 2014), lo anterior concuerda con Sampieri. (2018) mencionando que el alcance explicativo se direcciona a responder por la causa de los eventos, las condiciones como se manifiesta, además del por qué se relacionan con dos o más variables. El fundamento teórico metodológico utilizado fue el theory-driven research o investigación basada en la teoría y la técnica de estadística multivariada (SEM). En lo que respecta theory-driven research consta de los siguientes pasos, en primer lugar, identificar la brecha en investigación, seguidamente generar preguntas alrededor de dichas brechas, en tercer lugar, formular hipótesis relacionadas con los cuestionamientos científicos, después desarrollar estudios que relacionen los efectos, en cuarto lugar, capturar los datos con los instrumentos adecuados y finalmente analizar los datos para extraer conclusiones (Hepburn & Andersen, 2023; Maass et al., 2018).

3.3 Fases metodológicas

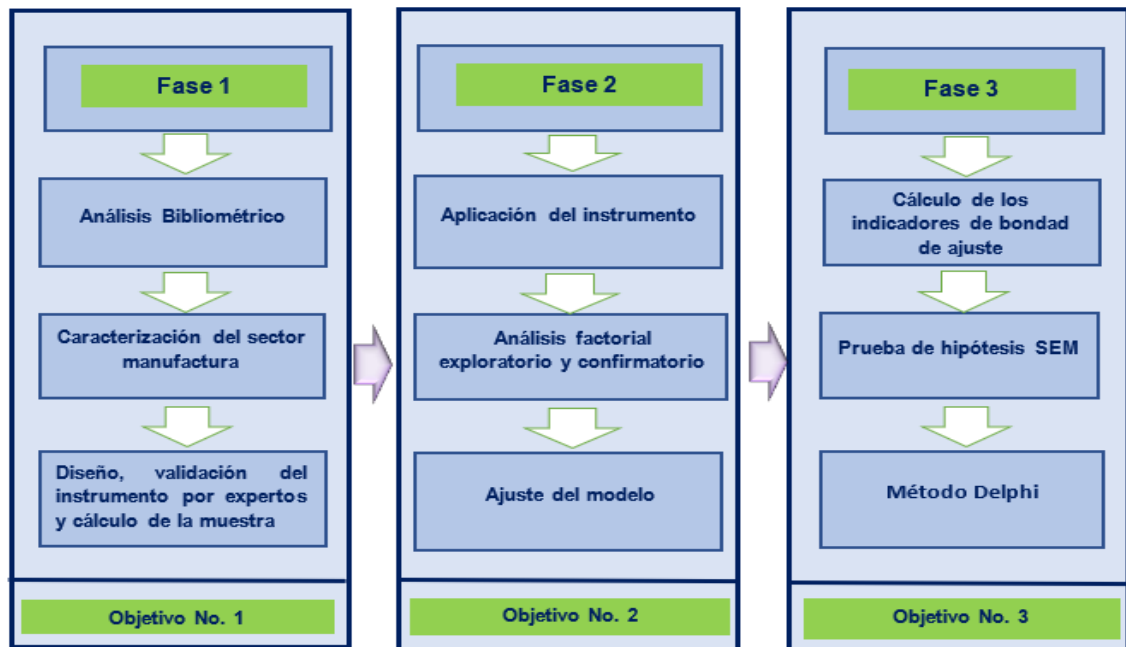
El enfoque metodológico constas de 3 fases propuestas relacionadas con los 3 objetivos específicos del proyecto, la figura 36 presenta el resumen de las etapas del estudio, además, la tabla 9 ilustra la relación entre las actividades y entregables que dieron cumplimiento a los objetivos propuestos, para identificar los posibles cuellos de botella en el proceso científico se diseñó un diagrama de flujo de la información el cual permite mapear el proceso, con la posible solución presentada (figura 37).

Tabla 9. Estructura metodológica

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	ENTREGABLES
Identificar las variables que definen mejor el efecto integrado de la industria 4.0 y el desempeño sostenible del sector manufactura.	Análisis bibliométrico y RSL	Conjunto de tecnologías y prácticas L&G que impactan en el desempeño sostenible
	Caracterización del sector manufactura	Base de datos de empresas del sector manufactura Santandereano
Diseñar un modelo SEM para evaluar el efecto de la industria 4.0 en L&G y el impacto en el desempeño sostenible.	Se diseñó un modelo de encuesta en escala Likert de 10 puntos.	Link de google forms https://forms.gle/jkDg5ddqoubHv4cB8
	Validación de encuesta por parte de expertos académicos y del sector Manufactura.	Formatos de evaluación de expertos
	Prueba piloto con empresas del sector objeto de estudio.	Encuesta estructurada, y diseñada en una plataforma virtual
	Cálculo de la muestra	Muestra de 181 empresas
	Aplicación del instrumento	Base de datos con 12198 empresas
Validar el modelo propuesto	Análisis factorial exploratorio	Constructos identificados
	Análisis factorial confirmatorio	Constructos definidos diagramados en AMOS.
	Ejecución del modelo SEM	Tabla con los resultados de la Evaluación de las hipótesis planteadas.

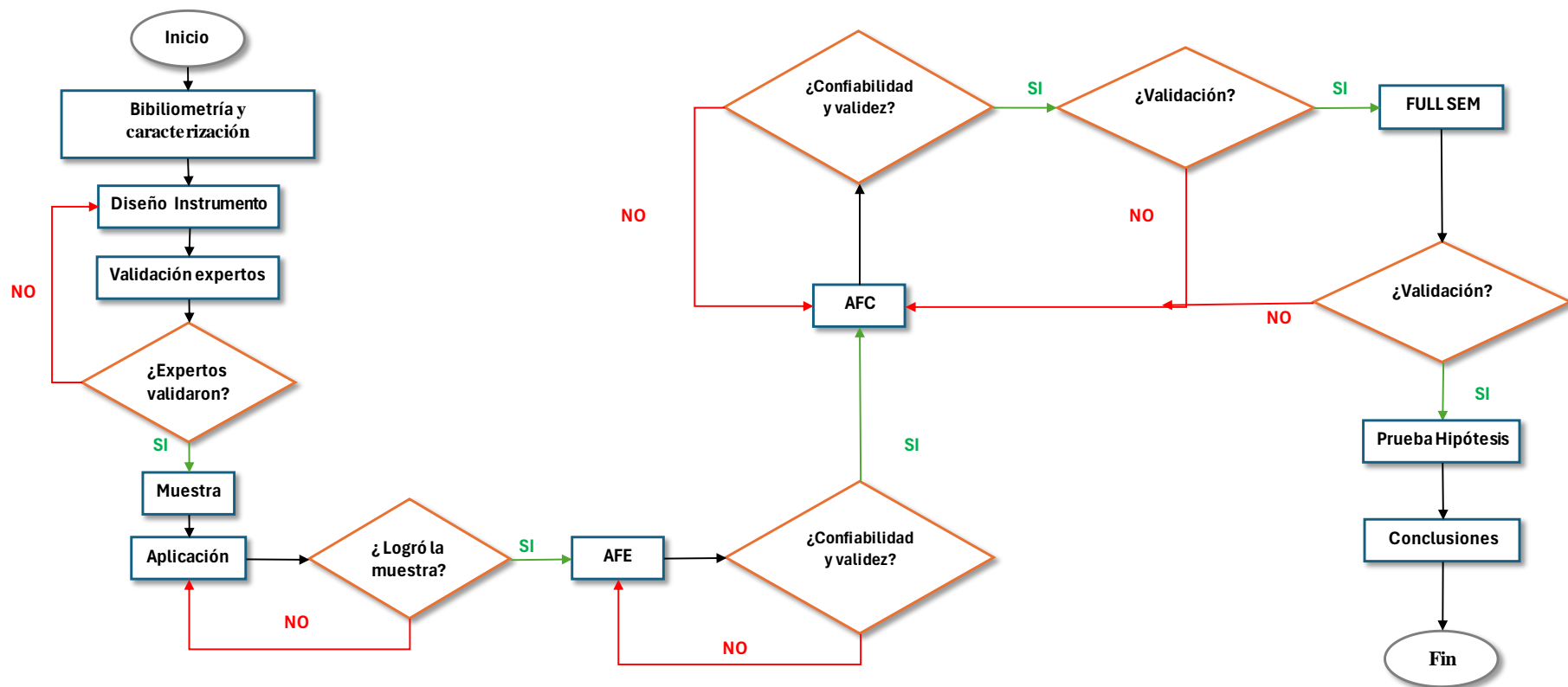
Nota: Creación propia

Figura 36. Fases metodológicas del proyecto



Nota: Creación propia

Figura 37. Diagrama de flujo de la investigación



Nota: Creación propia

3.3.1 Fase 1

El punto inicial de esta investigación fue realizar una RSL que se expuso en el capítulo 2 con el objetivo de conocer el listado de tecnologías que se relacionan con L&G y el DS, además de describir los sectores y subsectores que hacen parte del tejido empresarial manufacturero en Santander,

3.3.1.1 Brechas de investigación

El origen de esta investigación fue el trabajo realizado por Beltrami et al., (2021) en donde los autores en su RSL plantean un modelo conceptual el cual relacionan la IN4 con las prácticas sostenibles y el DS, además proponen tres posibles hipótesis que son la base de esta tesis doctoral, mencionando en primer lugar que la IN4 tiene un efecto directo en la implementación de prácticas sostenibles, seguidamente que la IN4 tiene un efecto directo positivo o negativo en el DS, finalmente las prácticas sostenibles median la relación entre la IN4 y DS. Se puede definir prácticas sostenibles como métodos o procedimientos que tienen un efecto positivo en el triple resultado de las empresas (Económico, Ambiental y Social) (Alayón et al., 2017). Por tanto y de acuerdo con todo lo expresado se puede considerar al enfoque L&G como prácticas sostenibles.

Cuando las empresas aplican prácticas L&G mejoran positivamente el triple resultado (Teixeira et al., 2021b). En lo que respecta con los trabajos que han estudiado la relación entre IN4, L&G y DS de acuerdo con los métodos utilizados en estos estudios los hallazgos de la RSL del capítulo 2 presentan

múltiples investigaciones que han utilizado estadística multivariada SEM del total de 68 artículos analizados solo 17 aplicaron este método, identificándose aportes valiosos a la literatura como por ejemplo el realizado por Raut et al. (2019).

Igualmente, Kamble et al. (2020) contribuye al conocimiento existente en IN4, Lean y su efecto mediador en DS proporcionando un modelo multivariado SEM; sin embargo, esta investigación no abordó las prácticas Green.

Por todo lo mencionado anteriormente se puede afirmar que no se ha realizado estudios por medio de SEM que aborden en conjunto y de forma concreta el efecto mediador de L&G entre la IN4 y el DS, en el contexto de países emergentes surgiendo la necesidad de entender esta posible relación para cerrar la brecha en el conocimiento científico por esto la importancia de realizar esta tesis doctoral.

3.3.1.2 Hipótesis

3.3.1.2.1 Efecto de la industria 4.0 en la cadena de suministro Lean and Green

Hoy en día, la IN4 es una tendencia relevante en los modelos de producción combinando un alto componente tecnológico con poca interacción humana con el fin de lograr altos estándares de automatización sin olvidar el cuidado de los ecosistemas (Amjad et al., 2021d; Zoubek et al., 2021). La IN4 puede apoyar la CS en medidas de control ambiental y seguridad logrando una mayor sostenibilidad (Luthra & Mangla, 2018; Machado et al., 2020). El vínculo de tecnologías con la gestión de inventarios y el diseño de centros de distribución afectan positivamente a la cadena de suministro L&G (Ramirez-Peña et al., 2020). En igual forma, L&G tiene por objetivo la efectividad; eficiencia del tiempo y los recursos, en

concordancia con los principios de la IN4, cuando se conjuga estos dos enfoques da origen a un modelo denominado L&G inteligente que conduce a una innovación en los procesos aumentando los desempeños estos (De Giovanni & Cariola, 2021b; John, Sampayo, & Pecas, 2021; Tripathi, Chattopadhyaya, Mukhopadhyay, et al., 2021; Verma & Sharma, 2021; Zekhnini et al., 2021). Cuando se supervisa los procesos de producción aplicando las tecnologías de IN4 ayudan a la implementación de las prácticas Lean, igualmente las fábricas y redes inteligentes apoyan las practica Green logrando una mayor eficiencia energética y en la productividad (Amjad et al., 2021d).

Así mismo, tecnologías como: los macrodatos y IoT mejora la implementación de las prácticas L&G (Leong, Teng, How, Ngan, Abd Rahman, et al., 2020). Finalmente, la IN4 puede proporcionar soporte tecnológico a los equipos en la fábrica identificando los desperdicios de producción y ambientales simultáneamente como, por ejemplo: el tiempo de espera y el consumo de energía, con el fin de desplegar estrategias L&G (Muñoz-Villamizar et al., 2021).

En consecuencia, la primera hipótesis es: H1a; H1b La Industria 4.0 tiene una influencia positiva y directa sobre Lean & Green.

3.3.1.2.2 Efecto de la industria 4.0 en Lean & Green y su impacto en el desempeño sostenible

Actualmente, existen constantes presiones ejercidas en el sector manufactura por las partes interesada con el fin de incorporar prácticas que sean eficientes generen rentabilidad y minimicen los impactos ambientales (Touriki et al., 2021) en consecuencia, el evaluar las variables de los indicadores claves de desempeño

de L&G se ha convertido en un factor relevante en el sector manufactura con el objetivo de conocer la competitividad de sus empresas (Singh et al., 2021).

Además, las fluctuaciones que se presentan en el mercado han obligado a las empresas a adoptar estrategias más efectivas que impacten en la sostenibilidad como la IN4, L&G y el concepto de circularidad (Yadav et al., 2020b). Cuando la gerencia invierte en innovación en los procesos apoyados por la IN4 mejora la relación entre L&G y el desempeño económico, operacional y ambiental (Amjad et al., 2021b, 2021d; De Giovanni & Cariola, 2021b; Muñoz-Villamizar et al., 2021). Las prácticas L&G junto al uso de tecnologías como: el control de producción inteligente y de energía, la automatización y los sistemas ciber físicos disminuyen la emisión de gases de efecto invernadero, además de aumentar los desempeños en el proceso de fabricación (Amjad et al., 2021d).

En línea con lo anterior, L&G con los avances tecnológicos como: los robots y vehículos autónomos, ciberseguridad, el uso de la CN y la RA tiene un impacto positivo en los pilares económicos y ambientales por su parte, la integración horizontal y vertical el blockchain, BD, IoT, AI aumentan el desempeño social (Ramirez-Peña et al., 2020). Así mismo, las prácticas Lean impulsan la adopción de tecnologías verdes generando productos innovadores amigables con el medio que tiene un impacto social (Afum et al., 2021). Por todo lo mencionado anteriormente la hipótesis dos es:

H2a; H2b: Existe una influencia mediadora de Lean & Green, entre la Industria 4.0 y el desempeño sostenible.

3.3.1.2.3 Efecto de la Industria 4.0 en el desempeño sostenible

En la actualidad surge una inclinación del sector industrial para implementar tecnologías con el propósito de mejorar los desempeños sostenibles (Gladysz et al., 2021; Jayashree et al., 2021; Luthra et al., 2020). La IN4 apoyada en tecnologías como CN, BD y IoT ayudan a mapear el proceso, soportando a los tomadores de decisiones, igualmente el control de la producción y de energía respaldado con tecnología disminuye la incertidumbre en la demanda y reduce los costos de electricidad (Amjad et al., 2021b). La literatura científica ha identificado una fuerte relación entre IN4 y los pilares económico ambiental y social de manera integrada (Amjad et al., 2021d; Luthra & Mangla, 2018; Varela et al., 2019b).

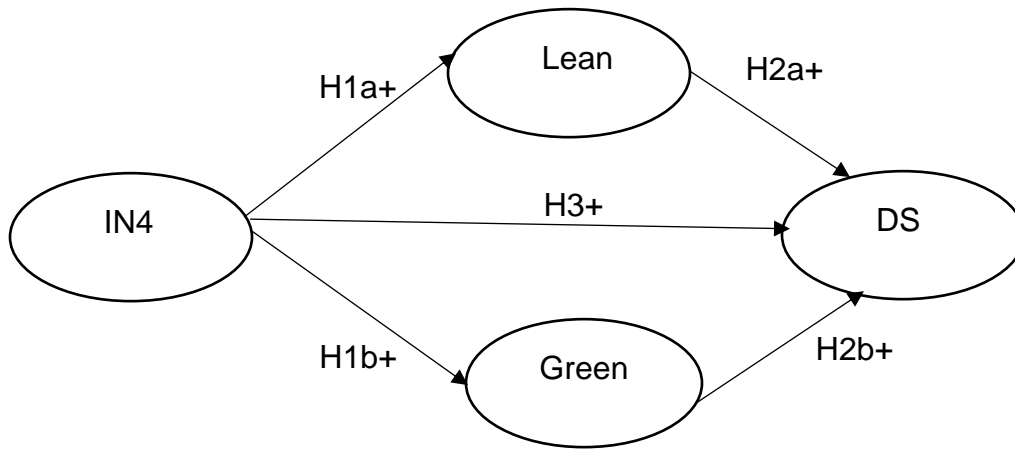
Lo anterior, se puede identificar en el pilar económico en la generación de innovación en los procesos productivos y de calidad, en la parte ambiental en el monitoreo del consumo de energía y finalmente en el social genera ambientes de trabajos más seguros y menos estresante (Braccini & Margherita, 2019). De acuerdo con el estudio realizado por Narula et al. (2021), existe una influencia de IN4 sobre los estándares del Global Reporting Initiative (GRI) económico, ambiental y social del: 85%, 65% y 50% respectivamente, lo anterior evidencia una influencia positiva de menor escala de la IN4 en los pilares ambientales y sociales, presentándose una asimetría en el DS (Narula et al., 2021).

Finalmente, la hipótesis tres es:

H3: La Industria 4.0 tiene un impacto directo y positivo en el desempeño sostenible.

Fundamentado en la RSL del capítulo 2, la brecha de investigación y el planteamiento de las hipótesis la figura 38 ilustra el modelo conceptual de esta investigación

Figura 38. Modelo Conceptual



Nota: Creación propia

3.3.1.3 Caracterización del sector manufactura

3.3.1.3.1 Ubicación Geográfica

En un contexto regional, el departamento de Santander está ubicado geográficamente en el Nor-orienté de Colombia con una extensión aproximada de 30.573 Km² equivalentes al 2.7% del territorio nacional, presentando una población de 2.306.455 habitantes equivalentes al 4.5% del total de los residentes de Colombia; además, está conformado por 87 municipios, teniendo como capital la ciudad de Bucaramanga (INVEST IN SANTANDER, 2023).

3.3.1.3.2 Análisis descriptivo del sector manufactura

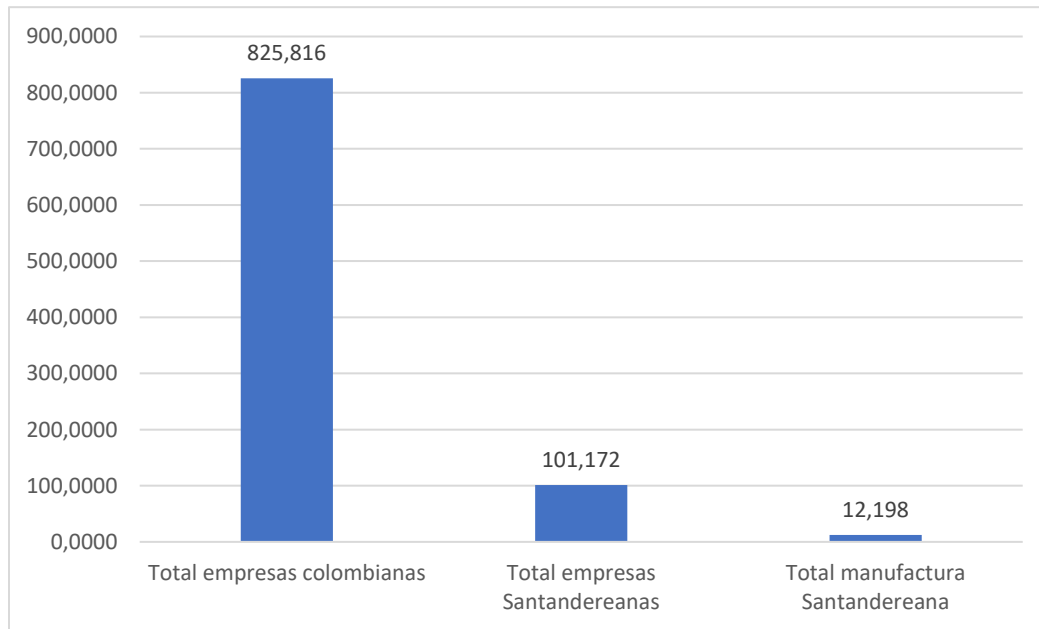
Iniciando desde el tejido empresarial colombiano en el I semestre del año 2022 y en concordancia con los datos registrados en la base Compite 360. (2023) existían registradas en las cámaras de comercio a nivel nacional y departamental 825.816 y 101.172 empresas, en lo que corresponde a Santander participa en el total nacional con un 12.3%; estas 101.172 empresas están agrupadas en 20 sectores, aplicando como parámetro los 5 sectores con mayor número de empresas (tabla 10), se encuentra en primer lugar, el comercio con 44,840 representado en un 44% del total de empresas Santandereanas, seguidamente manufactura con 12.198 equivalente a un 12%, en tercer lugar alojamientos, servicios de comida 10,853 representados en 11%, profesional científicas y técnicas 5,659 con un 6%. Finalmente, construcción con 5,208 equivalente a un 5%, de modo que, estos principales sectores conforman el 78% del total de las empresas Santandereanas, manufactura ocupa un relevante segundo lugar en la economía regional y en comparación con el total de empresas nacionales y departamentales contribuye con un 1.5% y 12% respectivamente (figura 39).

Tabla 10. Sectores manufactura regionales

No	Sectores	Empresas	Participación Total Empresas Santandereanas
1	Comercio	44,840	44.3%
2	Manufactura	12,198	12.1%
3	Alojamientos y servicios de comida	10,853	10.7%
4	Profesional científicas y técnicas	5,659	5.6%
5	Construcción	5,208	5.1%
6	Otras actividades de servicios	4,281	4.2%
7	Transporte	3,262	3.2%
8	Actividades de servicios administrativos y de apoyo	3,097	3.1%
9	Agrícola	2,262	2.2%
10	Información y comunicaciones	1,931	1.9%
11	Salud	1,505	1.5%
12	Actividades artísticas y de entretenimiento	1,466	1.4%
13	Financiero	1,438	1.4%
14	Inmobiliario	1,376	1.4%
15	Educación	872	0.9%
16	Distribución de agua, evacuación y tratamiento de aguas residuales	510	0.5%
17	Minero	273	0.3%
18	Suministros de electricidad gas vapor y aire acondicionado	95	0.1%
19	Administración pública y defensa	36	0.0%
20	Actividad de los hogares individuales en calidad de empleadores	10	0.0%
Total empresas		101,172	100.0%

Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360

Figura 39. Número de empresas Nacionales y regionales

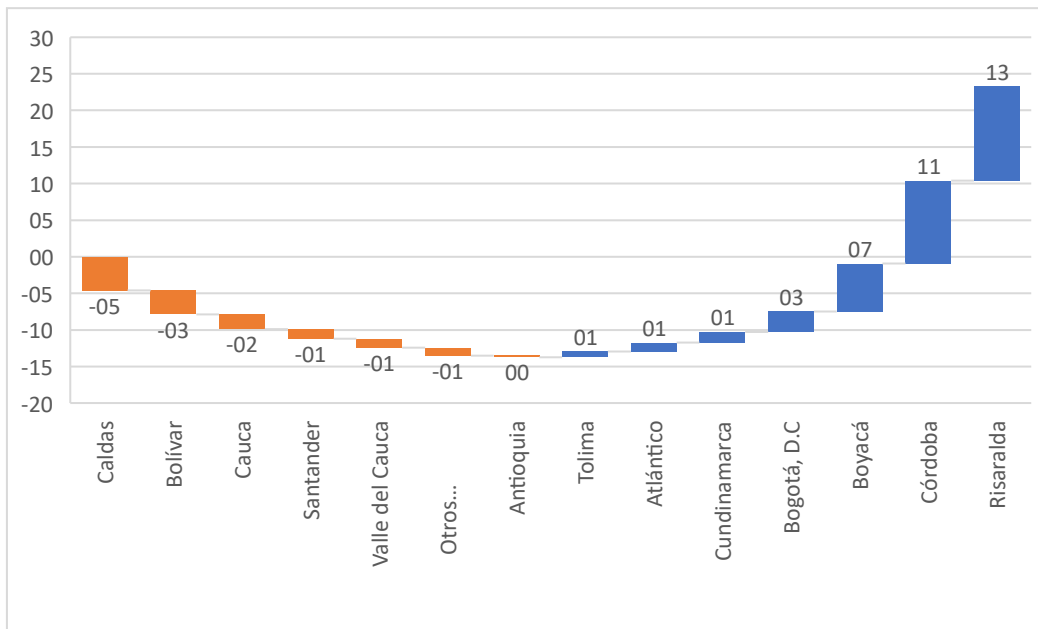


Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

Sin embargo, de acuerdo con la encuesta mensual manufacturera realizada por DANE. (2023) comparando los periodos de diciembre del 2021-2022 de los 14 departamentos que participan en el estudio el 50% (barra azul) presentaron

variaciones positivas en producción real aportando 1.3 puntos porcentuales (p.p) al consolidado nacional, en contraste Santander presento un efecto negativo en la contribución del total nacional de 0.1 p. p; además, en la variación real ocupó el puesto número 11 de los 14 departamentos presentando una cifra de -1.3% (figura 40).

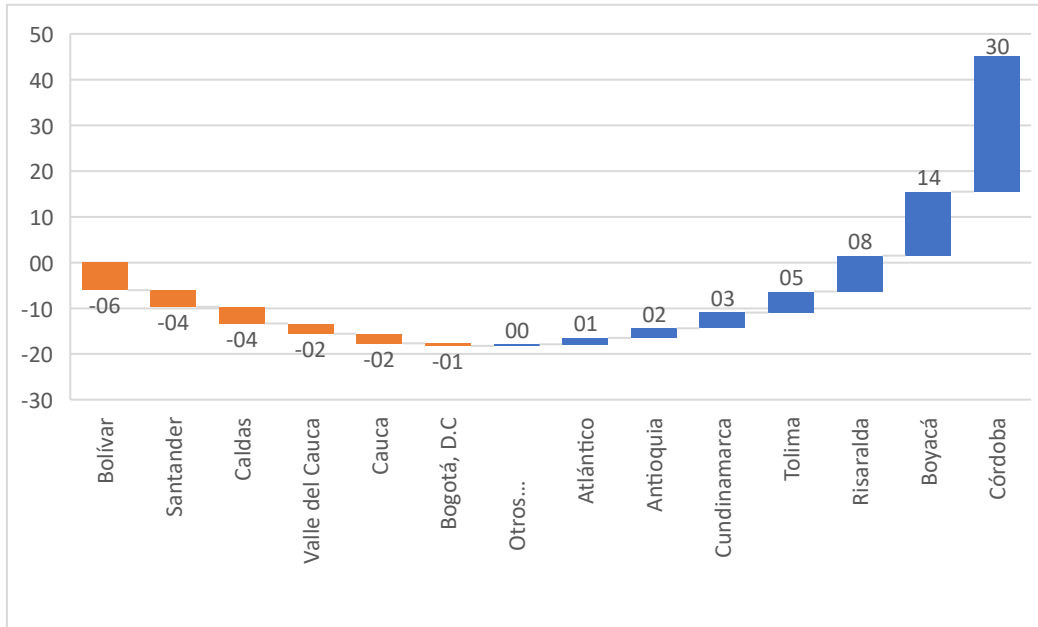
Figura 40. Variación anual de la producción real por departamentos



Nota Creación propia a partir de los resultados presentados por DANE (2023)

Igualmente, en lo relacionado con las ventas del sector objeto de estudio presentó un comportamiento similar, de los 14 departamentos siete mostraron variaciones positivas contribuyendo al total nacional en 1.9 p. p; no obstante, Santander impacto desfavorable en el total nacional de 0.2 p.p; igualmente y en lo que corresponde con la variación real el departamento ocupó puesto 13 reportando una cifra de - 3.7% del grupo de los 14 departamentos (figura 41).

Figura 41. Variación anual de las ventas reales por departamentos



Nota Creación propia a partir de los resultados presentados por DANE (2023)

El sector manufactura está conformado por 24 subsectores, tomando como parámetro de comparación el número de empresas (entre paréntesis) los 5 más representativos son en su respectivo orden: Alimentos (3.020), confecciones (1.810), curtido de cueros (1.442), instalación mantenimiento y reparación de maquinaria (1.143), fabricación de equipos elaborados de metal excepto maquinaria y equipos (891), estos principales subsectores contribuyen a total de empresas del sector en 24.8%,14.48,11.8%,9.4%,7.3%, por tanto; estos 5 subsectores conforman el 68% de empresas del sector objeto de estudio (tabla 11).

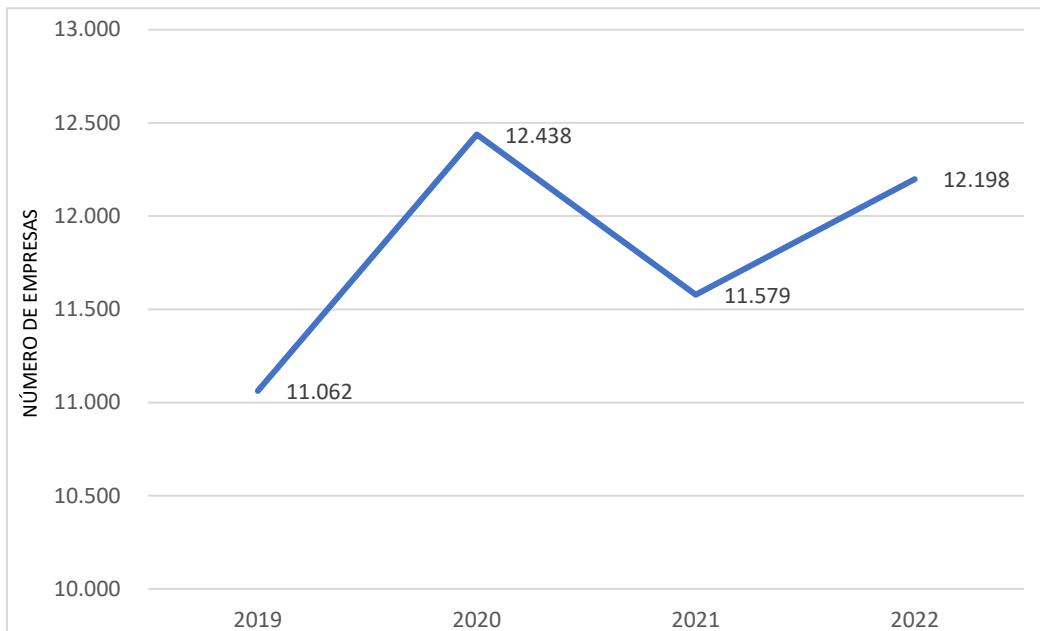
Tabla 11. Sub-sectores manufactura

No	Sub sectores	Número de empresas	Porcentaje de participación
1	Alimentos	3,020	24.8%
2	Confecciones	1,810	14.8%
3	Curtido y recurtido de cueros	1,442	11.8%
4	Instalación, mantenimiento y reparación de maquinaria	1,143	9.4%
5	Fabricación de productos elaborados de metal excepto maquinaria y equipo	891	7.3%
6	Otros	599	4.9%
7	Muebles y colchones	557	4.6%
8	Transformación de la madera y fabricación de productos de madera	469	3.8%
9	Textiles	347	2.8%
10	Actividades de impresión	326	2.7%
11	Químico	325	2.7%
12	Fabricación de productos minerales no metálicos	234	1.9%
13	Fabricación de maquinaria y equipo	162	1.3%
14	Fabricación de productos de caucho y plástico	159	1.3%
15	Vehículos y automotores	153	1.3%
16	Bebidas	130	1.1%
17	Fabricación de productos metalúrgicos básicos	100	0.8%
18	Tabaco	95	0.8%
19	Fabricación de aparatos y equipos eléctricos	56	0.5%
20	Fabricación de papel cartón y productos de papel y cartón	54	0.4%
21	Fabricación de productos informáticos electrónicos y ópticos	48	0.4%
22	Coquización y productos refinados del petróleo	33	0.3%
23	Farmacéutico	32	0.3%
24	Fabricación de otros equipos de transporte	13	0.1%
Total empresas del sector		12,198	100.0%

Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

Analizando la distribución histórica de las empresas del sector manufactura regional antes de la pandemia del COVID 19, se registraron en la CCB 11.032 empresas en el 2019 y 12.438 en el 2020 no obstante, como consecuencia de la crisis económica mundial el número de empresas decreció en un 7%, de esta figura se desprende que las políticas de reactivación económica, regionales y mundiales impulsaron el crecimiento en el número de empresas en los dos últimos años de un 5% (figura 42).

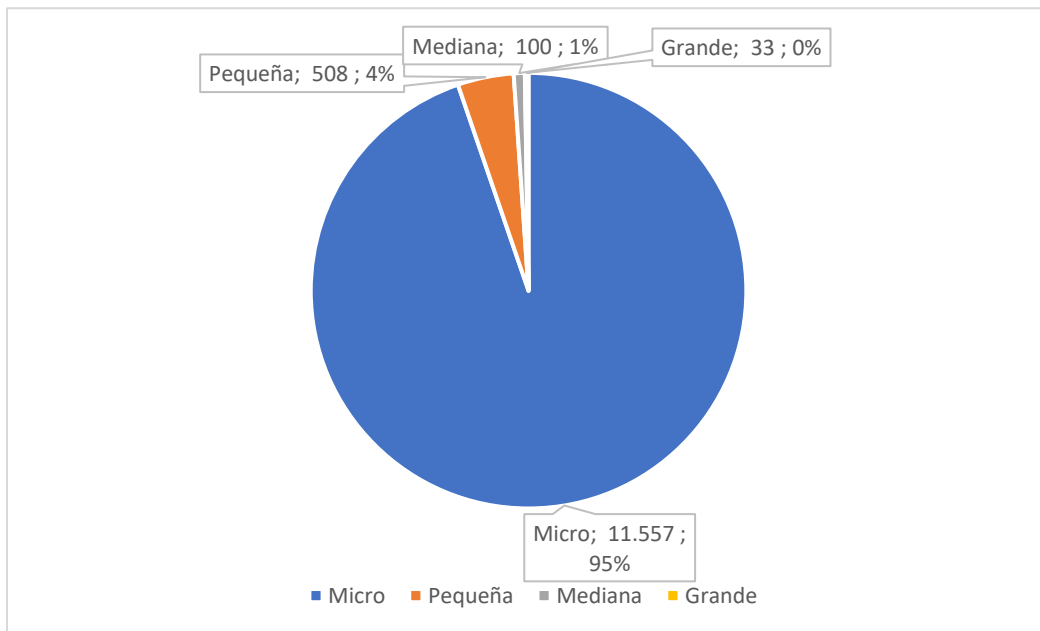
Figura 42. *Comportamiento histórico sector manufactura*



Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

Como se expone en la figura 43 existe una concentración del 95% de las empresas de manufacturas Santandereanas (11.557) son micro, de acuerdo con estos resultados el tejido empresarial sectorial en Santander se encuentra focalizado en un 99% en empresas catalogadas como micro y pequeña; no obstante, solo existen 33 empresas en Santander categorizadas como grandes equivalentes al 0.2% del total sector manufactura local.

Figura 43. Clasificación de empresas según su tamaño

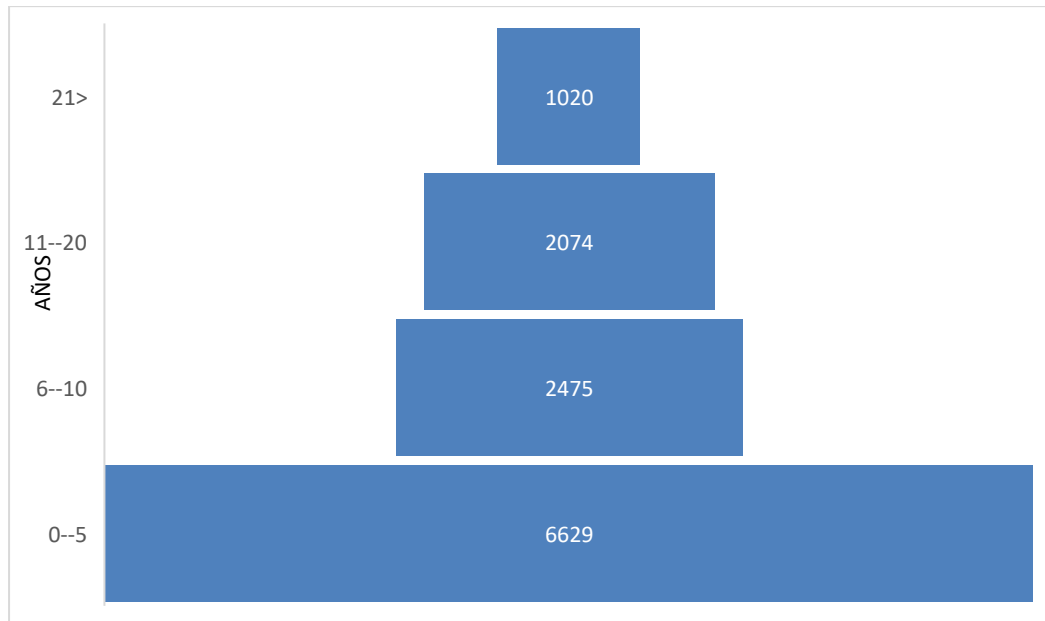


Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

La figura 44 presenta la agrupación de las empresas industriales regionales por la variable edad, el 54% de la industria manufacturera Santandereanas son en etapa inicial catalogadas en el rango de 0-5 años correspondientes a 6.629 empresas, el menor porcentaje registrado del sector (8%) representadas en 1.020 lo presento empresas en etapa avanzada mayores a 21 años.

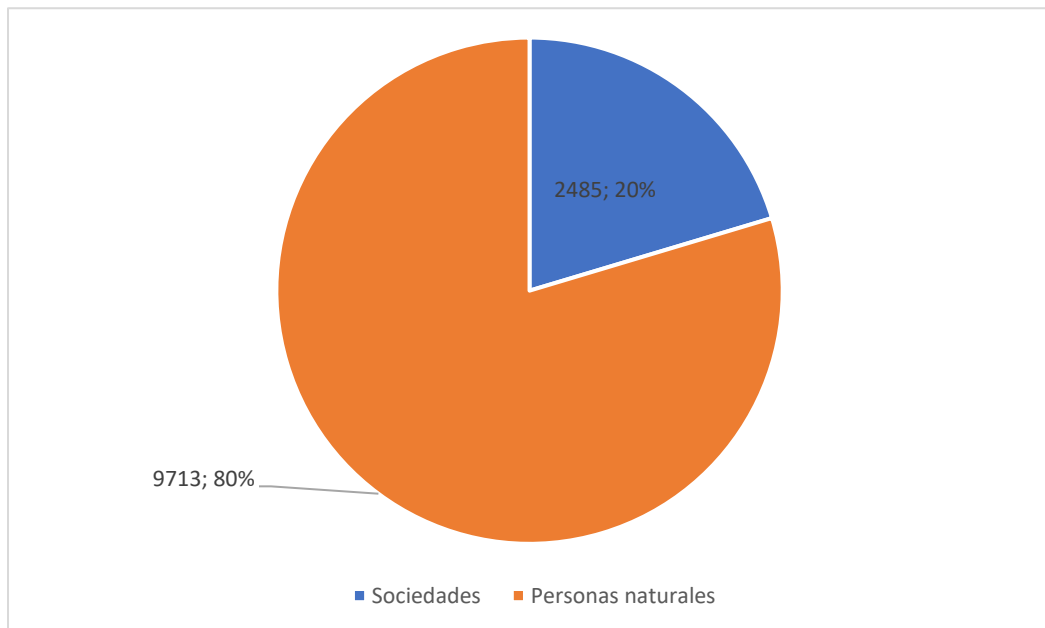
Con respecto al tipo de sociedad, la figura 45 presenta la distribución de las empresas por cantidad y porcentaje de participación del total del sector, el 80% de empresas equivalentes a 9.713 son personas naturales.

Figura 44. *Relación entre edad y el número de empresas*



Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

Figura 45. *Distribución de las empresas de acuerdo con el tipo de sociedad*

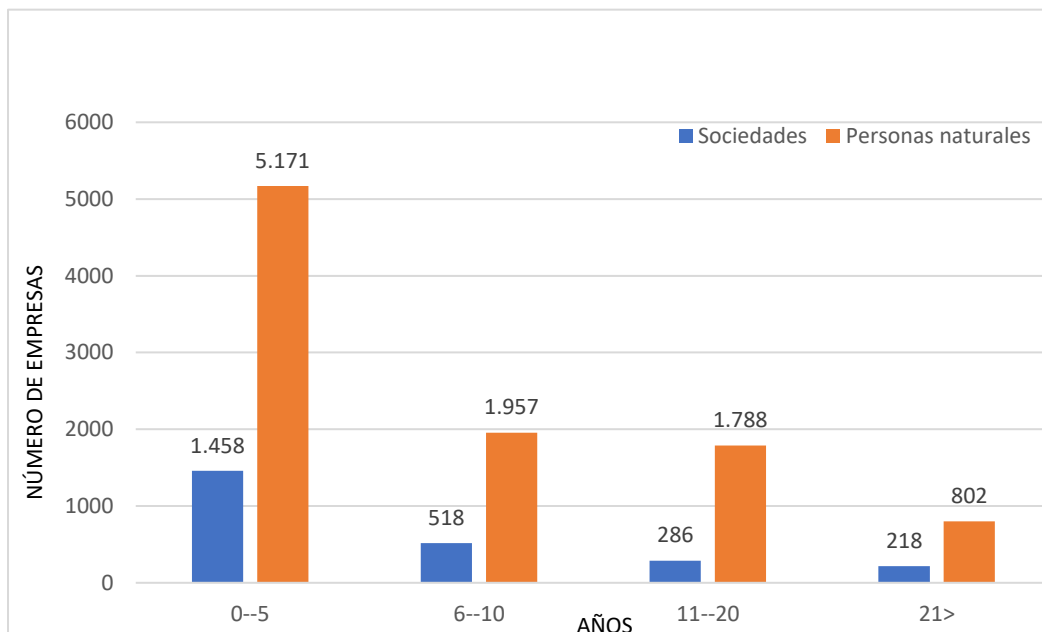


Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

3.3.1.3.3 Relación entre las variables empresariales

Cuando se analiza el vínculo entre las variables, tipo de sociedad y edad 5.171 son industrias categorizadas como personas naturales en el rango de 0-5 años equivalentes al 42% del total sector, en lo que respecta a las 1.458 sociedades son empresas en etapa inicial menores a 5 años representado en un 12% del total de empresas manufactureras, en contraste las bajas proporciones con respecto al sector manufactura presento empresas mayores a 21 años catalogadas como sociedades y personas naturales presentando cifras de 218 y 802 con participación en el sector manufactura del 2% y el 7% (figura 46).

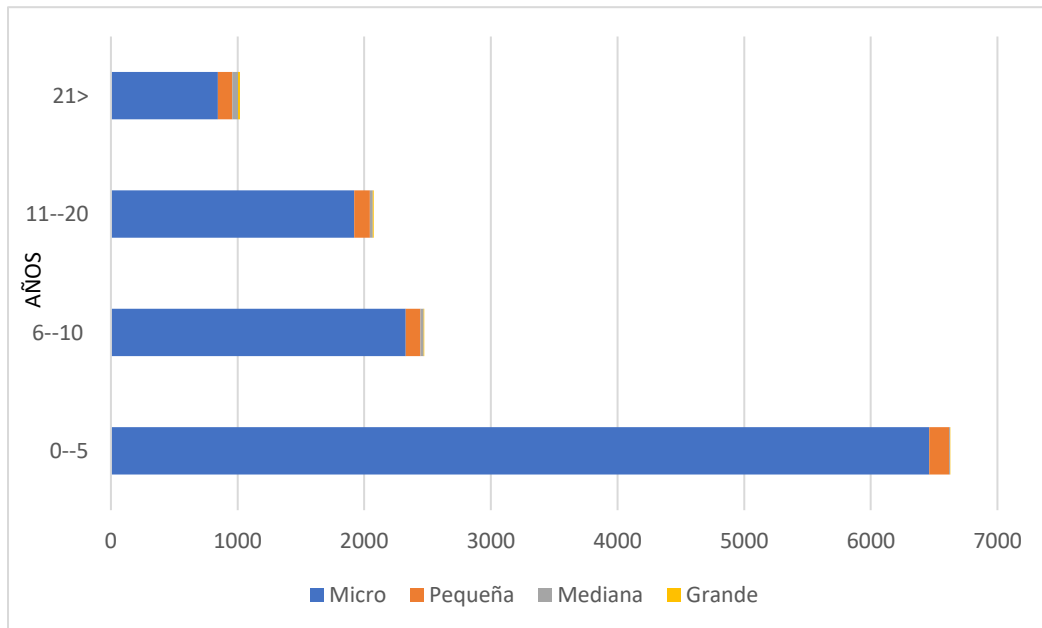
Figura 46. Relación entre el número de empresas y tipo de sociedad



Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

La figura 47 presenta la relación entre la edad y el tamaño de la industria, realizando un análisis de acuerdo al mayor número de empresas por tamaño en primer lugar se encuentra las micro con 6.642 equivalentes al 52% del sector que están en etapa inicial menores a 5 años, seguidamente pequeñas con 156 que corresponde al 1.3% del sector en el mismo rango de edad, en tercer lugar las medianas con 23 equivalentes al 0.18% del sector en edad de 6 a10 años; cifras idénticas se presentaron en el misma categoría en los rangos de edades de 11-20 años, finalmente solo 7 empresas grandes que corresponden al 0.05% del sector están en el rango de edad de 6-10 años; cifras equiparables se presentaron en el rango de edades de 11-20 años.

Figura 47. *Relación entre la edad y tamaño de la sociedad*



Nota: Creación propia a partir de los datos registrados en compite 360.

3.3.1.4 Diseño de la encuesta

Para el diseño de la encuesta y de acuerdo con los hallazgos de la literatura se procede a estructurar el instrumento de recolección de los datos que se presenta en el anexo 2 utilizando la escala de Liker de 10 puntos; tomando como referentes los instrumentos utilizados por: la ANDI. (2019) para la dimensión IN4, Jabbour et al. 2013; Rodrigues et al. (2020) para L&G y PAULRAJ. (2011); Zhu et al. (2008) para el DS, el instrumento se dividió en 9 secciones en la primera se presenta a los encuestados los aspectos generales de la investigación como el título, sector, tiempo de duración e información general del equipo de investigación; además se realizó un glosario (anexo 3) que permite conocer los términos relacionados con tecnologías IN4, L&G y DS, en la segunda sección se aborda la voluntariedad del encuestado y confidencialidad de la información; además se perfila la empresa en las variables tipo de empresa, tiempo de constitución, número de empleados, sector al que pertenece y cargo que desarrolla. La tabla 12 presenta la operacionalización de las variables utilizado en el diseño del instrumento.

Tabla 12. Operacionalización del instrumento de recolección de la información

Variable	Característica	Sección en la encuesta	Definición operacional	Referencia
IN4	Independiente	3-4	IN41 Disposición y uso de información en la nube IN42 Analítica de datos IN43 Analítica de grandes datos (Big data). IN44 Inteligencia de negocios (business intelligence). IN45 Internet de las cosas (IoT) IN46 Sensores IN47 Robótica y automatización.	ANDI. (2019)

Variable	Característica	Sección en la encuesta	Definición operacional	Referencia
L&G	Mediadora	5-6	IN48 Manufactura aditiva/impresión 3D IN49 Inteligencia artificial IN410 Realidad virtual/aumentada IN411 Aprendizaje automático (Machine learning). L.12 Programas para lograr mejorar el compromiso en los trabajadores L.13 Programas de mejora continua L.14 5S (Clasificar/ordenar/limpiar/estandarizar/seguimiento) L.15 Mantenimiento productivo total L.16 Método Kanban L.17 Justo a Tiempo L.18 Programas para la reducción de inventarios. L.19 Equipos Kaizen L.20 Programas para la colaboración con proveedores G.21 Políticas de gestión ambiental G.22 Programas para la formación ambiental para todos los empleados G.23 Programas 3Rs G.24 Desarrollo de productos con menores impactos ambientales. G.25 Procesos productivos con menores impactos ambientales G.26 Programas para la selección de proveedores con base en criterios ambientales G.27 Sistema de gestión ambiental (ISO 14001 u otros) G.28 Programas para la divulgación voluntaria de información sobre desempeño ambiental	Jabbour et al. 2013; Rodrigues et al.(2020)
			E.29 Disminución del costo del consumo de energía. E.30 Disminución del costo de los materiales comprados	PAULRAJ. (2011); Zhu et al. (2008)
Desempeño sostenible (DS)	Dependiente	7-9		

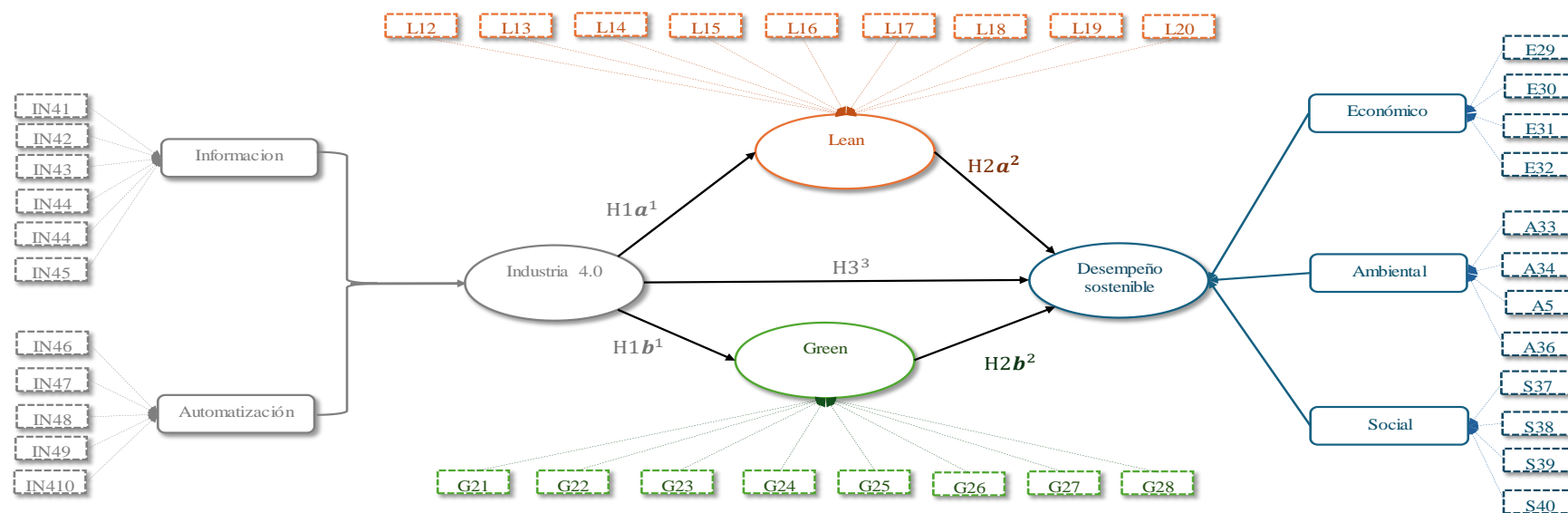
Variable	Característica	Sección en la encuesta	Definición operacional	Referencia
			E.31 Mejoramiento del retorno de la inversión. E.32 Mejoramiento de las ganancias por acción A.33 Disminución de los residuos (agua y/o sólidos). A34 Disminución del consumo de materiales peligrosos/nocivos/tóxicos. A35 Aumento de la energía ahorrada debido a la conservación y la eficiencia en las mejoras A36 Disminución en las emisiones al aire S.37 Mejoramiento en la seguridad y salud en el trabajo de los empleados S.38 Mejoramiento en el bienestar general de las partes interesadas S.39 Mejoramiento en la salud y seguridad de la comunidad. S.40 Disminución de los impactos ambientales y riesgos para la comunidad.	

Nota: Creación propia

3.3.2 Fase 2

Para el inicio de esta etapa se realizó la consulta de expertos con el objetivo de validar el instrumento los cuales tienen formación en PhD en Electrónica, ingeniería industrial, gestión de la tecnología y la Innovación y administración, profesionales que aportaron con sus comentarios con la construcción de la encuesta, las opiniones realizadas por los expertos fueron tomadas en cuenta para ajustarlo en las preguntas, la figura 48 presenta el boceto gráfico del modelo conceptual.

Figura 48. Modelo hipotético



Nota: 1. H1a -H1b se respalda con los trabajos de Amjad et al. (2021c); De Giovanni & Cariola (2021c); John, Sampayo, & Pecas, (2021b); Leong, Teng, How, Ngan, Rahman, et al. (2020) Luthra & Mangla (2018); Machado et al. (2020b); Muñoz-Villamizar et al. (2021). Ramirez-Peña et al. (2020); Tripathi, Chattopadhyaya, Bhadauria, et al. (2021b); Verma & Sharma (2021) Zekhnini et al.,(2021) 2. H2a-H2b se respalda con las investigaciones de Afum et al. (2021); Amjad et al. (2021c) ; De Giovanni & Cariola (2021c); Muñoz-Villamizar et al. (2021); Ramirez-Peña et al. (2020); Touriki et al.(2021b) ; Singh et al. (2021); Yadav et al. (2020c); 3.H3 se respalda con los trabajos de Amjad et al. (2021c); ; Braccini & Margherita (2019); Gladysz et al. (2021);Jayashree et al. (2021); Luthra et al..(2020); Narula et al.(2021); Varela et al. (2019).

3.3.2.1 Selección de muestra y captura de datos.

En esta investigación se presenta un abordaje de tipo deductivo en el cual se estudian elementos identificados mediante una teoría predeterminada usando datos primarios (Bag et al., 2023), para la realización de esta tesis doctoral los participantes del estudio fueron las empresas del sector manufacturero ubicadas en Colombia en el departamento de Santander. Con respecto al producto interno Bruto nacional (PIB) precios corrientes en el año 2022 en miles de millones de acuerdo con DANE. (2022) fue de \$ 1,462,522, la cifra reportada por el mismo concepto por el departamento fue de \$ 92,277 equivalente a un 6.3% del PIB total, en lo que respecta a la manufactura regional la cifra alcanzada es de \$16, 953 aportando un 1.16% al PIB colombiano y 18% al regional por tanto la importancia del sector manufactura Santandereano como contribuyente al PIB nacional y regional. En segundo lugar, en Colombia existen 825.816 empresas de acuerdo con Compite 360, (2023), la cifra reportada por esta misma base de datos en Santander es de 101.172 de las cuales el sector manufactura local es 12.198 participando con un 1.5% y 12% del total tejido empresarial nacional y local, por todo lo expresado anteriormente el sector manufacturero Santandereano es representativo para la producción y el tejido empresarial nacional y regional.

Esencialmente se recolecto información mediante la aplicación de un cuestionario por medio de correos masivos, para esto se utilizó la base de datos abierta suministrada por la CCB en la página Web www.datos.gov.co/ del portal público del ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones filtrando por el criterio de empresas manufactureras santandereanas, obteniendo

datos importantes como: el nombre del representante legal de la empresa, teléfono, correo electrónico, nombre/razón social, código ciuu, tipo de sociedad, subsector, domicilio de la empresa, lo mencionado anteriormente sirvió como insumo para enviar y contactar vía telefónica a los manufactureros santandereanos de los 87 municipios de Santander para responder la encuesta. Además, se participó en ferias, empresariales en las cuales apoyados por las autoridades, gubernamentales y gremios empresariales se permitió suministrar la encuesta en los eventos a los industriales locales. La tabla 13 presenta los parámetros utilizados para el diseño muestral, para esto se diseñó un mailing con el objetivo de brindar información rápida sobre el objetivo del estudio figura 49. La tabla 14 presenta los datos de las cinco principales industrias que respondieron la encuesta concentrándose el 46% en empresas clasificadas como de elaboración de productos alimenticios y confecciones de prendas de vestir.

Figura 49. Mailing con incrustación de la encuesta



Nota: Creación Universidad Santo Tomás

Tabla 13. Parametrización muestral

Crterios de la muestra	Datos
País	Colombia
Departamento	Santander
Sector	Manufactura
Unidad de análisis	Empresas
Población	12.198
Valor Z	1.96
Nivel de confianza	95%
Margen de error	8%
Muestra	149
Datos recolectados	181

Nota: Creación propia

Tabla 14. Clasificación cinco principales subsectores

Tipo de industria	Número de empresas	%	Empleados promedio	Años promedio
Elaboración de productos alimenticios.	66	36.5%	66	8
Confección de prendas de vestir.	17	9.4%	9	10
Elaboración de productos textiles.	10	5.5%	10	7
Fabricación de joyas, bisutería y artículos conexos	9	5.0%	2	4
Curtido y recurtido de cueros; fabricación de calzado; Fabricación de artículos y artículos similares, y fabricación de artículos de talabartería y guarnicionería y teñido de pieles.	8	4.4%	8	8
Fabricación de muebles colchones y somieres.	8	4.4%	5	5
Total	110	65.2%	100	

Nota: Creación propia

La tabla 15 presenta como resultado que el cargo de mayor respuesta fue los gerentes generales que respondió en su mayoría la encuesta representada en un 66% seguida por el de jefe con un 17% de las 181 respuestas seleccionadas.

Tabla 15. Cargos desempeñados por los encuestados

Cargo	Número de respuestas
Gerente general	119
Gerente de departamento	13
Jefe	30
Supervisor	10
Operario	9
Total	181

Nota: Creación propia

Igualmente, se participó como conferencista invitado en temas relacionados tecnologías, producción limpia y sostenibilidad empresarial en eventos organizados por diferentes actores regionales públicos, académicos y empresariales que reunían empresarios manufactureros santandereanos a los cuales se les solicitó de manera voluntaria el diligenciamiento del instrumento. La tabla 16 resume los eventos organizados y asistidos con el objetivo de transferir el conocimiento a los diferentes actores regionales.

Tabla 16. *Asistencia a eventos y conferencias científicos y empresariales*

Actor(es)	Categoría	Evento	Conferencia	Modalidad
Gobernación de Santander	Público	Primera feria departamental de negocios verdes	Estrategias tecnológicas disruptivas para la manufactura sostenible	Presencial
Gobernación de Santander-Innpulsa	Público-empresarial	Capacitación empresarios	Estrategias tecnológicas disruptivas para la manufactura sostenible	Virtual
Premios verdes	Sin ánimo de lucro	Reconocimiento regional ganadores Santandereanos	Estrategias tecnológicas disruptivas para la manufactura sostenible	Presencial
Universidad Santo tomas	académicos	Conferencia centro de consultoría empresarial	Estrategias tecnológicas disruptivas para la manufactura sostenible	Virtual
Universidad Santo tomas- Cámara de comercio de Bucaramanga	académico-empresarial	Capacitación empresarios	Estrategias tecnológicas disruptivas para la manufactura sostenible	Virtual
Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB) -sistema general de regalías	Académico público	Capacitación empresario	Buenas prácticas y tecnologías para la producción limpia en el sector manufactura	Presencial
Universidad de Santander	Académico	IV congreso internacional Conferencia	Estrategias de fabricación inteligente para lograr la sostenibilidad empresarial	

Nota: Creación propia

4. Validación

El objetivo de este capítulo es comenzar con la validación del modelo conceptual propuesto en la sección anterior, para esto se inicia con el Análisis factorial exploratorio (AFE), para examinar posible estructura factorial, seguidamente se realiza el análisis de confiabilidad y validez de los constructos. Finalmente se verifica la estructura factorial por medio del análisis factorial confirmatorio (AFC). En el diseño del modelo SEM se analiza en primer lugar el método common method bias (CMB) de acuerdo con Yu et al. (2021) se puede estudiar por medio del AFE y junto con el AFC con este propósito se utilizó el software estadístico SPSS versión 26, finalmente las hipótesis planteadas del modelo SEM se probaron por medio del software extensión AMOS versión 24.

4.1 Análisis factorial exploratorio - AFE

Los modelos SEM consisten en dos etapas, la primera tiene por objetivo validar las variables latentes y el segundo es probar las hipótesis relacionadas con los factores no observables (Raut et al., 2019b), iniciaremos con el AFE, definiéndolo como un método estadístico que tiene por objetivo la exploración con gran exactitud de las variables latentes provenientes de las observadas (Mavrou, 2015). En el AFE no se tiene certeza en el número y naturaleza de las variables, no se pueden predeterminar que variables contribuyen a los factores subyacentes, de allí su nombre de exploratorio (Harris & Gleason, 2022; Williams et al., 2010), siendo sus principales objetivos explorar patrones, relaciones y reducir información (Raut et al., 2019b), realizándose el AFE por cada dimensión IN4, L&G y DS.

4.1.1 Confiabilidad y validez

En el diseño de un modelo SEM es primordial la comprobación de la confiabilidad y validez del instrumento de la encuesta (Amofah & Chai, 2022). Con este propósito, se utilizó las métricas de Kaiser Meyer Olkin (KMO) analizando la adecuación de la muestra en donde valores mayores de KMO a 0.50 se consideran apropiado junto con la prueba de esfericidad de Bartlett con un valor $p < 0.05$ demostrando que las correlaciones permiten el análisis de componentes principales (Lu et al., 2020a; Raut et al., 2019b; Walsh et al., 2022), para seleccionar del número óptimo de factores se aplicó la varianza total explicada con valores mínimos a 0.50 (Streiner, 1994). La tabla 17 presenta las métricas de confianza, validez y extracción de los constructos. Por todo lo mencionado anteriormente, se demuestra la confianza de la información recopilada lo que permite avanzar con el proceso de análisis (Hair et al., 2010).

Tabla 17. Métricas de confiabilidad y extracción de los factores

Dimensión	Número de factores a extraer	Varianza total explicada	KMO	Test de Bartlett	Alfa
IN4	1	52%	0.83	0.000	0.86
Lean	1	70%	0.92		0.95
Green	1	68%	0.88		0.93
Desempeño sostenible	1	67%	0.92		0.95

Nota: Creación propia en SPSS.

Las comunales de las variables miden la participación de la variación explicada por factores comunes donde valores mayores a 0.5 indican que la variable está bien explicada por el modelo (Reimann et al., 2002; A. A. Syed et al., 2021; Yin et al., 2021). Sin embargo, Osborne et al. (2008), mencionan que las

comunalidades pueden tener un valor de corte de 0.40 como mínimo (tabla 18). Por tanto, se elimina la variable IN41 al no cumplir con este criterio.

Tabla 18. *Estimación de las comunalidades*

Dimensión	Variable Observada	Comunalidad
IN4	IN42	0,523
	IN43	0,594
	IN44	0,543
	IN46	0,508
	IN47	0,48
	IN48	0,485
	IN410	0,481
	IN411	0,551
Lean	L12	0,673
	L13	0,783
	L14	0,685
	L15	0,780
	L16	0,722
	L17	0,731
	L18	0,691
	L19	0,635
	L20	0,648
	Green	G21
G22		0,743
G23		0,721
G24		0,770
G25		0,739
G26		0,682
G27		0,460
G28		0,551
DS	E29	0,572
	E30	0,426
	E31	0,665
	E32	0,587
	A33	0,731
	A34	0,680
	A35	0,756
	A36	0,712
	S37	0,720
	S38	0,684
	S39	0,747
	S40	0,775

Nota: Creación propia en SPSS

4.2. Análisis factorial confirmatorio - AFC

El AFC permite analizar la relación y el nivel de importancia entre las variables observadas con las latentes (Raut et al., 2019b), además valida el modelo resultante del AFE (S. Kamble et al., 2020; Sant' Ana et al., 2023), con este fin se estudió la dimensión IN4 como variables independientes, L&G como variables mediadoras y DS como variable dependiente fueron analizadas y validadas para el cálculo de las métricas del AFE utilizando la herramienta diseñada por Gaskin & Lim (2017).

4.2.1 Fiabilidad de los constructos

Con la intención de garantizar la confiabilidad y validez del constructo se estudió la validez convergente y discriminante (Ebrahim & Alothman, 2022). Se puede definir validez convergente como la relación de la nueva escala con otras variables y métricas del mismo constructo (Krabbe, 2017). Esta técnica permite la flexibilización entre la estimación de las relaciones entre las variables, logrando modelar con variables latentes que no tienen errores de medida (Scrima, 2015), garantizando la validez convergente si se cumple estos cinco criterios:

1. La fiabilidad convergente (CR) es igual o superior a 0.70 (Al-Haddad et al., 2022; Chin, 1998; Ebrahim & Alothman, 2022; M. A. Sadiq et al., 2021).
2. Las cargas factoriales de los constructos deben ser mayor a 0.60 (Chin et al., 1997).
3. La varianza media extraída (AVE) es mayor o igual a 0.50 (Al-Haddad et al., 2022; Ebrahim & Alothman, 2022; Fornell, 1985) .

4. Los valores del AVE sean mayores a los valores máximos de la varianza compartida (MSV) (Ebrahim & Alothman, 2022; Rakib et al., 2022). Sin embargo, el AVE puede ser una métrica rigurosa, por tanto, solo utilizando el CR como medida de análisis se puede concluir que la validez convergente del constructo es conveniente (Malhotra & Dash, 2011).

5. El coeficiente de confiabilidad máxima Max R(H) mayor o igual a 0.70 (Gaskin & Lim, 2017; Hair et al., 2010). Para la validez discriminante si la raíz cuadrada del AVE de cada constructo es mayor a las correlaciones de los ítems (Ebrahim & Alothman, 2022; Fornell & Larcker, 1981a; Rakib et al., 2022). La tabla 19 presenta el cálculo de los anteriores criterios mencionados realizados por medio de la herramienta de Gaskin & Lim. (2016). Con el propósito de alcanzar los límites de los anteriores parámetros se eliminaron las variables observadas N41 IN42 IN43 IN44 IN45 IN47 IN48 IN49 L19 L20 G24 G25 G26 G27 G28 E29 E30 E32 S37 S38 S39.

Tabla 19. Validez y confiabilidad convergentes

	CR	AVE	MSV	MaxR(H)	Lean	Green	IN4	DS
Lean	0,941	0,669	0,514	0,947	0,818			
Green	0,892	0,735	0,775	0,905	0,667***	0,857		
IN4	0,789	0,560	0,120	0,831	0,347***	0,254**	0,748	
DS	0,935	0,706	0,775	0,940	0,717***	0,880***	0,196*	0,840

Nota: Creación propia utilizando la herramienta de Gaskin & Lim. (2016) análisis de significancia *** p < 0.001; ** p < 0.010

El criterio Heterotrait-Monotrait (HTMT), también se utiliza para evaluar estadísticamente la validez discriminante estimado como la relación entre las correlaciones de las dimensiones, la media, y las correlaciones de las dimensiones

con las medias de otros constructos siendo el valor aceptado por debajo de 0.90 (Almufarreh & Arshad, 2023a; Mia et al., 2022; Waqar et al., 2023a). La tabla 20 presenta los cálculos para el criterio HTMT cumpliendo con los parámetros establecidos.

Tabla 20. *Criterio HTMT*

Lean	Green	IN4	DS
Lean			
Green	0,642		
IN4	0,416	0,316	
DS	0,703	0,849	0,236

Nota: Creación propia utilizando la herramienta (Gaskin et al., 2019)

La figura 50 presenta el modelo de medición conformado por las cargas factoriales estandarizadas el ajustes y errores en donde las cargas factoriales son mayores a 0.25 de acuerdo con Hu & Bentler. (1999), lo anterior se demuestra con las tablas 21-22 presentando una buena configuración y ajuste de los indicadores de los constructos. Las adecuaciones al modelo se realizaron con el índice de modificación de la herramienta AMOS, permitiendo optimizar en el modelo, mejorar la sencillez, el ajuste, capacidad explicativa además disminuye el error de medición y residuos estructurales (Huang et al., 2023).

Tabla 21. *Cargas factoriales no estandarizadas*

Variable observada	Dimensión	Estimador	S.E.	C.R.	Valor P
L12	<---Lean	1			
L13	<---Lean	1,059	0,056	18,995	***
L14	<---Lean	1,123	0,101	11,095	***
L15	<---Lean	1,234	0,104	11,875	***
L16	<---Lean	1,253	0,109	11,479	***
L17	<---Lean	1,205	0,102	11,761	***
L18	<---Lean	1,12	0,102	10,941	***

Variable observada	Dimensión	Estimador	S.E.	C.R.	Valor P
L19	<---Lean	1,053	0,107	9,881	***
G23	<---Green	1,05	0,071	14,822	***
G22	<---Green	0,986	0,055	17,789	***
G21	<---Green	1			
E31	<---DS	1			
A34	<---DS	1,26	0,113	11,178	***
A36	<---DS	1,362	0,118	11,583	***
A35	<---DS	1,302	0,114	11,373	***
S40	<---DS	1,204	0,105	11,448	***
A33	<---DS	1,31	0,111	11,845	***
IN411	<---IN4	1			
IN46	<---IN4	0,98	0,134	7,296	***
IN410	<---IN4	0,752	0,091	8,274	***

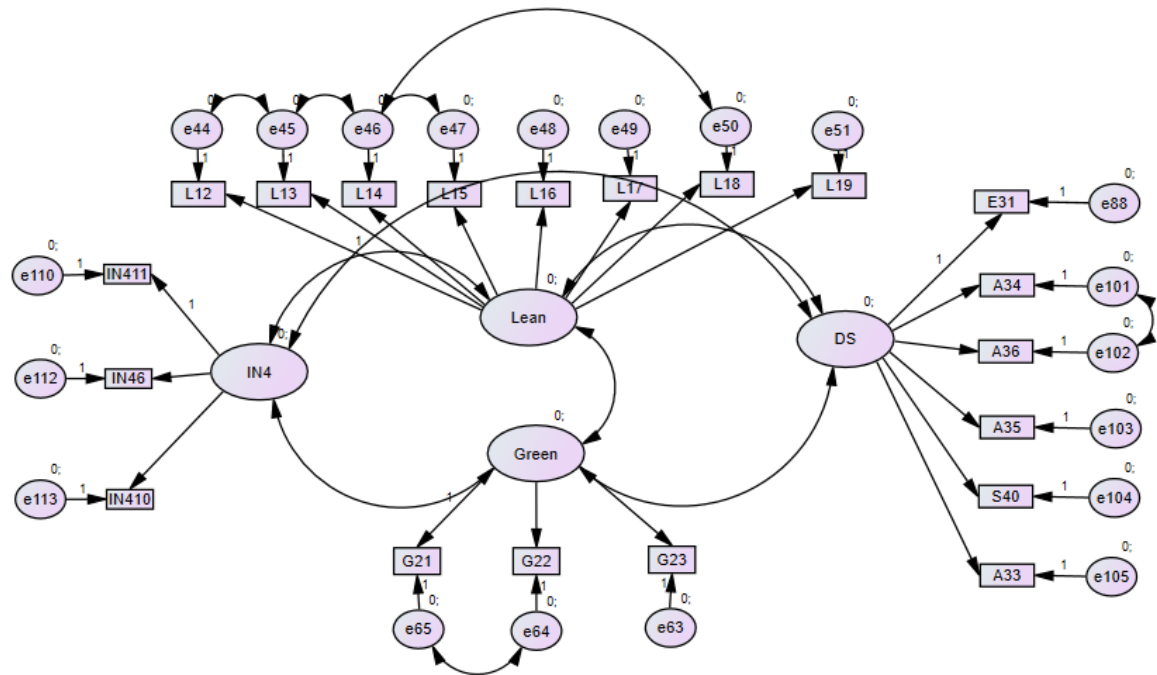
Nota: Creación propia en AMOS; análisis de significancia *** p < 0.001 ** p < 0.010

Tabla 22. Cargas factoriales estandarizadas

Variable observada	Dimensión	Std Beta
L12	<---Lean	0,726
L13	<---Lean	,809 ***
L14	<---Lean	,833 ***
L15	<---Lean	,882 ***
L16	<---Lean	,852 ***
L17	<---Lean	,872 ***
L18	<---Lean	,816 ***
L19	<---Lean	,739 ***
G23	<---Green	,915 ***
G22	<---Green	,816 ***
G21	<---Green	0,837
E31	<---DS	0,721
A34	<---DS	,840 ***
A36	<---DS	,869 ***
A35	<---DS	,853 ***
S40	<---DS	,858 ***
A33	<---DS	,887 ***
IN411	<---IN4	0,869
IN46	<---IN4	,607 ***
IN410	<---IN4	,746 ***

Nota: Creación propia por medio de la herramienta de Gaskin & Lim, (2018); *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

Figura 50. Modelo de medición



Nota: Creación propia en AMOS

4.2.2 Validación del modelo de medición

El modelo de medición presentó indicadores pertinentes en primer lugar (tabla 23), los grados de libertad fueron de 158,000 positivos y un χ^2 de 268,551 arrojando una relación 1.7. De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 23 se demuestra la pertinencia del modelo de medición factorial confirmatorio, conforme con los cortes mínimos estimados por Hair et al., (2010); Hu & Bentler, (1999); dando paso siguiente en el capítulo cinco a la prueba de hipótesis con el modelo estructural.

Tabla 23. *Indicadores de bondad de ajuste modelo de medición*

Medida de ajuste del modelo	Indicador	Reporte	Corte	REFERENCIA
Chi-cuadrado Comparaciones con la línea base	χ^2 / GL	1.7	1-3	Hair et al., (2010); Hu & Bentler, (1999).
	IFI (Índice de ajuste incremental)	0.96	>0.9	
Medidas ajustadas por parsimonia	TLI (Tucker- Lewis)	0.96	>0.9	
	CF I(Índice de ajuste comparativo)	0.96	>0.9	
	PNFI (Índice de ajuste normado de parsimonia)	0.76	>0.5	
	PCFI (Parsimonia Fija Comparativa)	0.82	>0.6	
RMSEA(Error cuadrático medio)	RMSEA	0.06	0.06-0.08	

Nota: Creación propia en AMOS

5. Resultados e interpretación

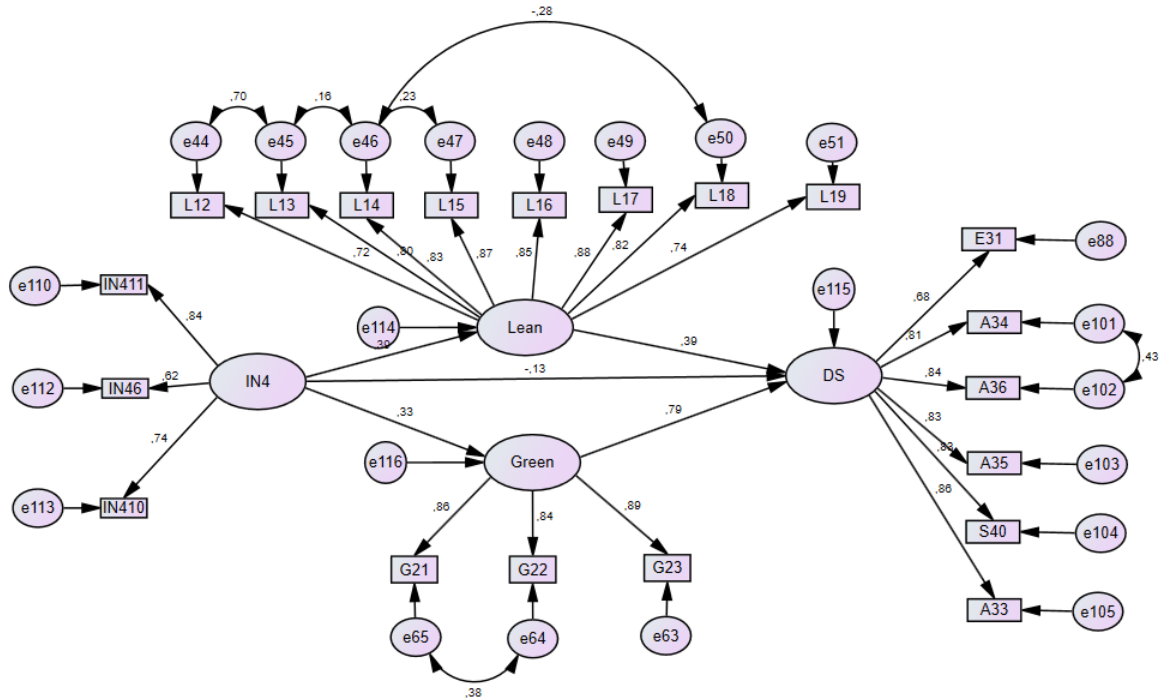
En este capítulo se desarrolla la comprobación de las hipótesis planteadas en el aparte tres, validando los factores latentes e hipótesis basadas en los factores observables (Raut et al., 2019b), además se presenta el método bootstrapping utilizado para probar el tipo de mediación de IN4 a DS en presencia de L&G del modelo estructural.

5.1 Modelo estructural

La fortaleza del análisis SEM en comparación con el estudio de regresión posibilita estimar las relaciones causales entre las variables basados en los errores de medición (Ghaithan et al., 2021). En el diseño de modelos SEM consta de dos etapas se inicia con la validación previa de las variables latentes y la segunda es la comprobación de las hipótesis fundamentadas en las variables observada, lo anterior se puede lograr utilizando como insumo el modelo AFC cambiando las líneas oblicuas de dos puntas por rectas de una sola (Raut et al.,

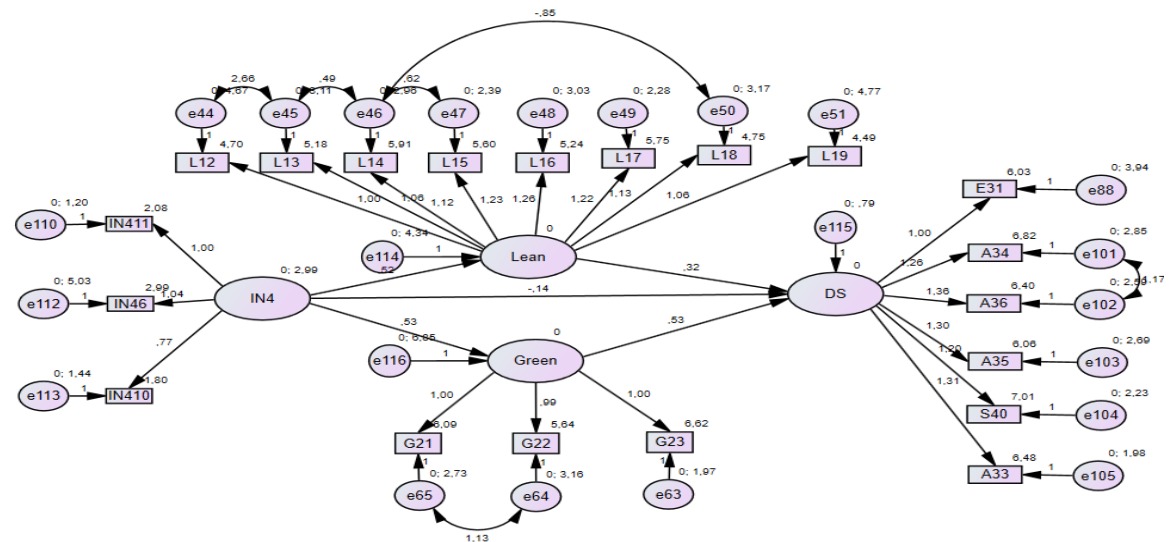
2019b). La figura 51 y 52 presenta el modelo estructural con los coeficientes estandarizados y no estandarizados construido utilizando como insumo el AFE.

Figura 51. Modelo estructural estimadores estandarizados



Nota: Creación propia en AMOS

Figura 52. Modelo estructural estimadores no estandarizados



Nota: Creación propia en AMOS

5.1.1 Evaluación del modelo estructural

Los indicadores de ajuste del modelo presentados fueron los siguientes los grados de libertad y el χ^2 fue de 159,000 y 338,567 para una relación de 2.1, los indicadores presentados son pertinentes de acuerdo con Kamble et al. (2020); Raut et al. (2019) (tabla 24). La tabla 25 y 26 presenta los valores de las cargas factoriales no estandarizadas y estandarizadas, siendo todos significativos de acuerdo con su valor P, para Lean<---IN4; Green<---IN4; DS<---Lean; DS<---Green; DS<---IN4. Para el cálculo de los valores P de los coeficientes estandarizados se utilizó la herramienta diseñada por Gaskin & Lim, (2018).

Tabla 24. Indicadores de bondad de ajuste modelo estructural

Medida de ajuste del modelo	Indicador	SEM	CORTE	REFERENCIA
Chi-cuadrado	χ^2 /GL	2.1	1-3	Hair et al., (2010); Hu & Bentler, (1999).
Comparaciones con la línea base	IFI (Índice de ajuste incremental)	0.94	>0.9	
	TLI (Tucker-Lewis)	0.93	>0.9	
	CFI (Índice de ajuste comparativo)	0.94	>0.9	
Medidas ajustadas por parsimonia	PNFI (Índice de ajuste normado de parsimonia)	0.75	>0.5	
	PCFI (Parsimonia Fija Comparativa)	0.78	>0.6	
	RMSEA	0.079	0.06-0.08	

Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS

Tabla 25. Cargas factoriales no estandarizadas

Variable observada	Dimensión	Estimador	S.E.	C.R.	P
Lean	<---IN4	0,517	0,116	4,446	***
Green	<---IN4	0,526	0,141	3,726	***
DS	<---Lean	0,319	0,056	5,68	***
DS	<---Green	0,525	0,061	8,621	***
DS	<---IN4	-0,143	0,069	-2,062	0,039*
L12	<---Lean	1			
L13	<---Lean	1,056	0,056	18,882	***
L14	<---Lean	1,117	0,102	10,949	***

L15	<---Lean	1,226	0,105	11,682	***
L16	<---Lean	1,26	0,11	11,44	***
L17	<---Lean	1,217	0,103	11,766	***
L18	<---Lean	1,131	0,103	10,953	***
L19	<---Lean	1,056	0,107	9,834	***
G23	<---Green	0,998	0,071	14,136	***
G22	<---Green	0,987	0,055	17,895	***
G21	<---Green	1			
E31	<---DS	1			
A34	<---DS	1,256	0,128	9,838	***
A36	<---DS	1,359	0,133	10,204	***
A35	<---DS	1,301	0,13	10,046	***
S40	<---DS	1,201	0,119	10,086	***
A33	<---DS	1,308	0,125	10,445	***
IN411	<---IN4	1			
IN46	<---IN4	1,038	0,137	7,585	***
IN410	<---IN4	0,771	0,09	8,534	***

Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS análisis de significancia *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

Tabla 26. Análisis de significancia coeficientes estandarizados

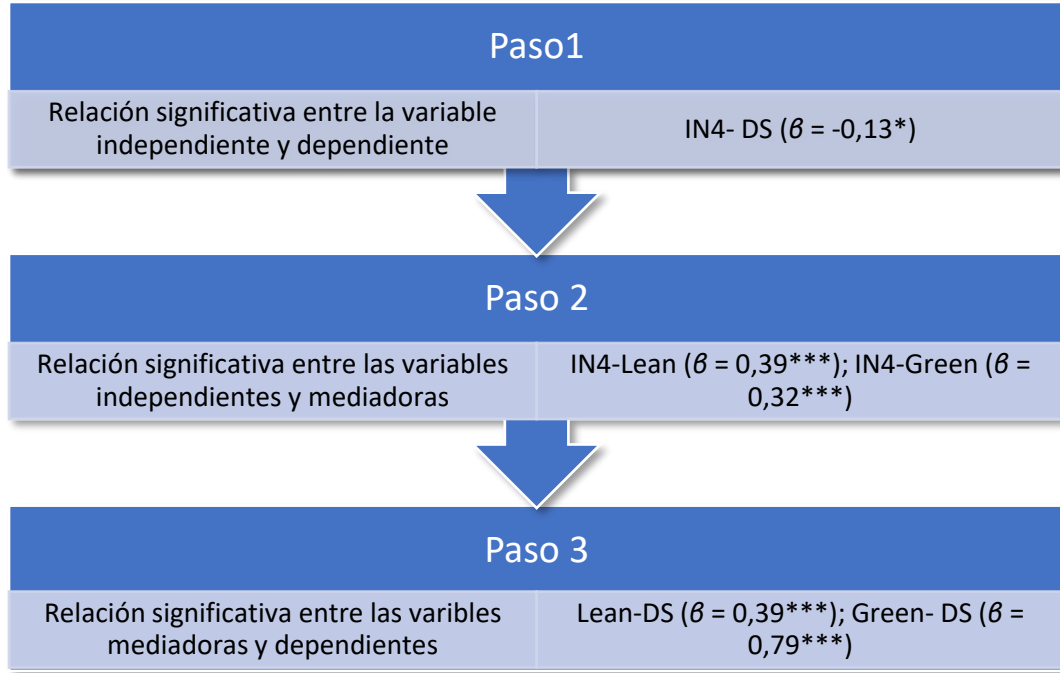
Variable observada	Dimensión	Std Beta
Lean	<---IN4	,395 ***
Green	<---IN4	,328 ***
DS	<---Lean	,392 ***
DS	<---Green	,791 ***
DS	<---IN4	-,135 *
L12	<---Lean	0,724
L13	<---Lean	,805 ***
L14	<---Lean	,827 ***
L15	<---Lean	,874 ***
L16	<---Lean	,854 ***
L17	<---Lean	,877 ***
L18	<---Lean	,821 ***
L19	<---Lean	,739 ***
G23	<---Green	,892 ***
G22	<---Green	,838 ***
G21	<---Green	0,859
E31	<---DS	0,68
A34	<---DS	,808 ***
A36	<---DS	,841 ***
A35	<---DS	,825 ***
S40	<---DS	,829 ***
A33	<---DS	,863 ***
IN411	<---IN4	0,844
IN46	<---IN4	,625 ***
IN410	<---IN4	,744 ***

Nota: Creación propia por medio de la herramienta de Gaskin & Lim, (2018); *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

5.2 Método para evaluar el efecto de mediación

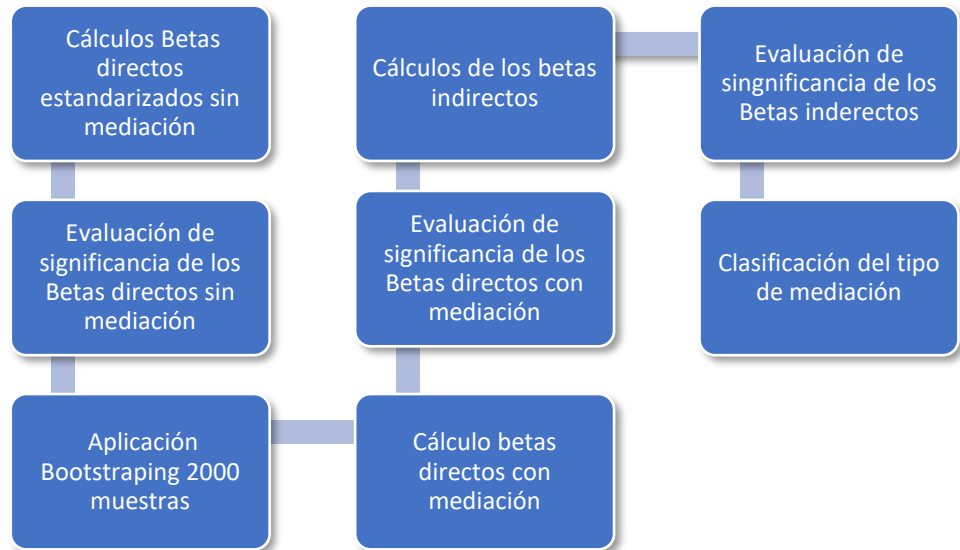
Para probar el efecto de mediación de L&G entre la relación de IN4 con DS se aplicó el enfoque previo de Baron & Kenny. (1986) (Figura 53) en el cual por medio de las pruebas de los coeficientes de mediación de las diferentes variables se puede demostrar el efecto mediador (MacKinnon et al., 2012). Seguidamente de comprobar la posibilidad de mediación, de L&G entre IN4 y DS se debe confirmar el tipo de mediación parcial o total con aplicando el enfoque utilizado por Pérez et al. (2023) por medio de la técnica de bootstrapping para probar la mediación (figura 54). De acuerdo con Kamble et al. (2020) existen tres posibles resultados de la mediación: en primer lugar, parcial cuando el efecto directas e indirectas de la variable independiente a la dependiente a través de la variable mediadora son significativos, en segundo lugar mediación total cuando el efecto directo de la variable independiente a la dependiente en presencia de la mediadora es no significativo y el efecto indirecto de la dependiente sobre la independiente es significativo, finalmente se puede decir que no hay mediación cuando los efectos indirectos no son significativo, igualmente cuando no hay significancia entre los efectos directos de la variable independiente con la mediadora y de la mediadora con la dependiente.

Figura 53. Fases de evaluación del efecto mediador



Nota: Creación propia de acuerdo con el método de Baron & Kenny, 1986 *** $p < 0.001$ ** $p < 0.010$; * <0.05

Figura 54. Proceso clasificatorio de la medición

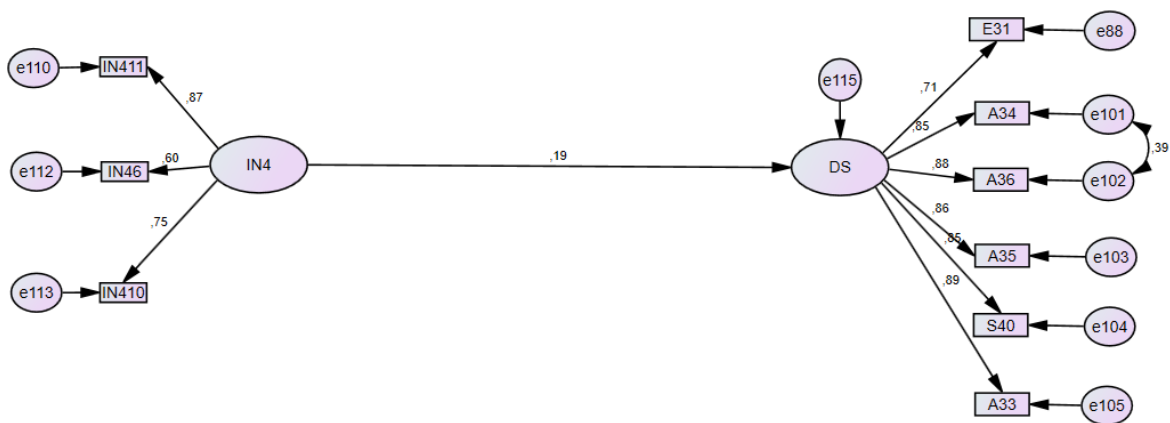


Nota: Creación propia de acuerdo con el método de Perez et al. (2023).

5.2.1 Relación directa sin mediación

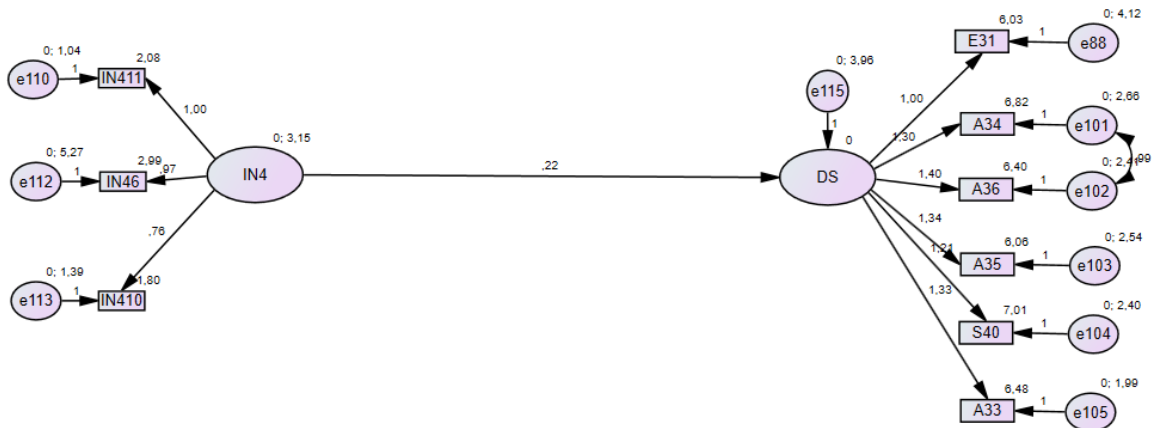
El primer paso es probar la relación directa con los pesos de regresión estandarizados entre la IN4 y el DS ejecutando el modelo sin las variables mediadoras L&G. La figura 55 presenta el modelo sin mediación estandarizados, la tabla 23 presenta la evaluación a un nivel de significancia del 0.05 la IN4 logró un efecto robusto en el DS del 0.19*, cuando IN4 aumenta en 1 DS aumenta en 0.19 (tabla 27). La figura 56 presenta, los coeficientes no estandarizados, interpretándose como un incremento de una unidad de la IN4, DS aumenta en 0.22* (tabla 28).

Figura 55. Modelo estructural sin mediación estimadores estandarizados



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS

Figura 56. Modelo estructural sin mediación estimador es no estandarizados



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS

Tabla 27. Análisis de significancia

Variable observada	Dimensión	Std Beta
DS	<---IN4	,194 *
E31	<---DS	0,707
A34	<---DS	,850 ***
A36	<---DS	,878 ***
A35	<---DS	,863 ***
S40	<---DS	,845 ***
A33	<---DS	,887 ***
IN411	<---IN4	0,867
IN46	<---IN4	,601 ***
IN410	<---IN4	,753 ***

Nota: Creación propia por medio de la herramienta de Gaskin & Lim, (2018); *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

Tabla 28. Cargas no estandarizadas modelo sin mediación

Variable observada	Dimensión	Estimadores	S.E.	C.R.	P
DS	<---IN4	0,222	0,098	2,26	0,024*
E31	<---DS	1			
A34	<---DS	1,3	0,119	10,897	***
A36	<---DS	1,404	0,125	11,254	***
A35	<---DS	1,343	0,121	11,093	***
S40	<---DS	1,209	0,111	10,871	***
A33	<---DS	1,335	0,117	11,379	***
IN411	<---IN4	1			
IN46	<---IN4	0,972	0,138	7,044	***
IN410	<---IN4	0,76	0,097	7,869	***

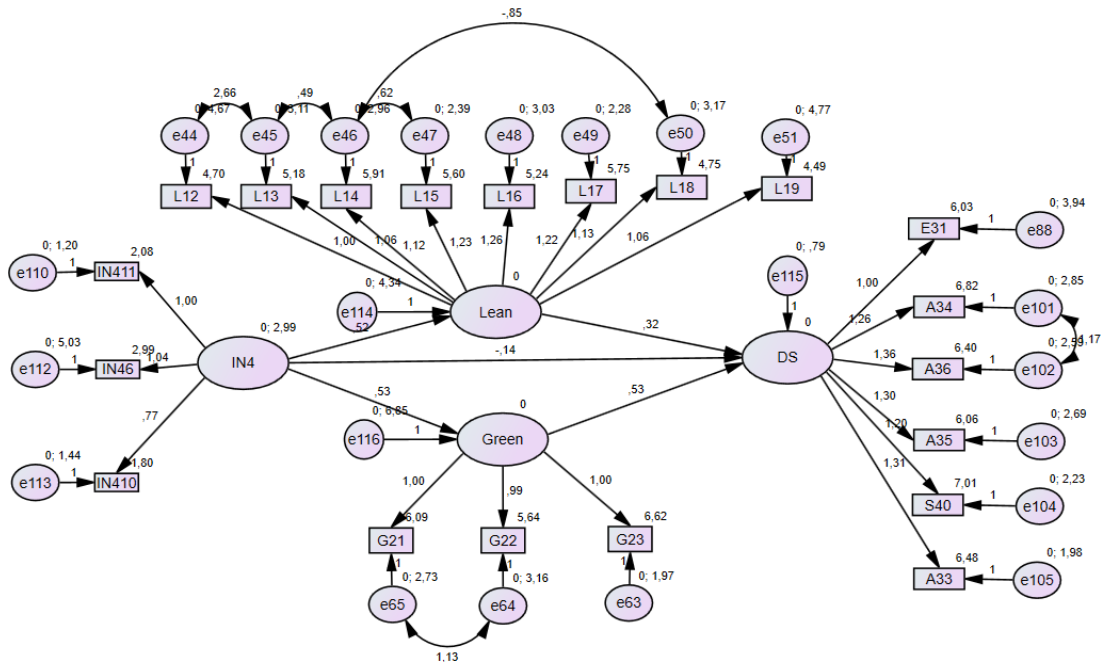
Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

5.2.2 Relación hipotética Directa e indirecta con mediación

El procedimiento utilizó el método de bootstrapping aplicando un número de 2000 cálculos de muestras para asegurar la robustez de los efectos mediadores en la investigación lo cual se considera apropiado (Lavidas et al., 2023; Xiaoyi et al., 2023), con un intervalo de confianza de los sesgos del 90% (Figura 57 y 58) se utilizó la herramienta desarrollada por Gaskin & Lim, (2018a) presentando cifras de IN4 --> Lean --> DS 0,155*** y IN4 --> Green --> DS 0,260**.

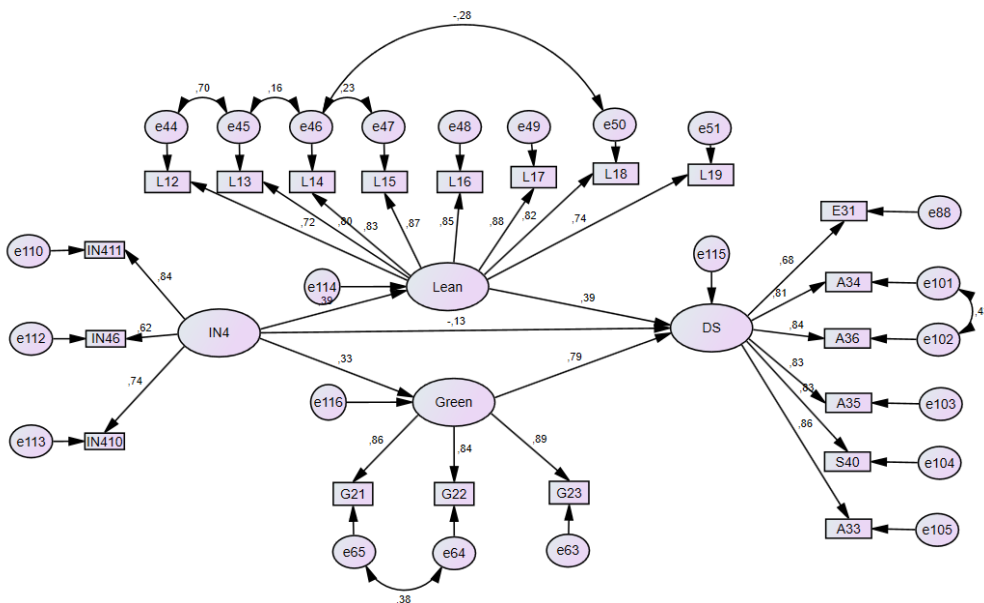
La tabla 29 y 30 presenta las cargas estandarizadas directas e indirectas de L&G en dirección a DS con cifras de 0,392***, 0,791***; para los efectos directos estandarizados, y de 0,155*** y 0,260** para los indirectos estandarizados siendo todos significativos.

Figura 57. Resultados bootstrapping coeficientes no estandarizados



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** $p < 0.001$ ** $p < 0.010$; * < 0.05

Figura 58. Resultados bootstrapping coeficientes estandarizados



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** $p < 0.001$ ** $p < 0.010$; * < 0.05

Tabla 29. Efectos directos estandarizados

Variable	IN4	Green	Lean	DS
Green	0,328*	0	0	0
Lean	0,395***	0	0	0
DS	-0,135*	0,791***	0,392***	0
IN410	0,744***	0	0	0
IN46	0,625***	0	0	0
IN411	0,844***	0	0	0
A33	0	0	0	0,863***
S40	0	0	0	0,829***
A35	0	0	0	0,825***
A36	0	0	0	0,841***
A34	0	0	0	0,808***
E31	0	0	0	0,68***
G21	0	0,859***	0	0
G22	0	0,838***	0	0
G23	0	0,892***	0	0
L19	0	0	0,739***	0
L18	0	0	0,821***	0
L17	0	0	0,877***	0
L16	0	0	0,854***	0
L15	0	0	0,874***	0
L14	0	0	0,827***	0
L13	0	0	0,805***	0
L12	0	0	0,724***	0

Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

Tabla 30. Efectos indirectos estandarizados

Indirect Path	Unstandardize d Estimate	Lower	Upper	P-Value	Standardized Estimate
IN4 --> Lean --> DS	0,165	0,09	0,829	0	0,155***
IN4 --> Lean --> DS --> E31	0,165	0,09	0,829	0	0,155***
IN4 --> Lean --> DS --> A34	0,207	0,115	1,011	0	0,155***
IN4 --> Lean --> DS --> A36	0,224	0,122	1,063	0	0,155***
IN4 --> Lean --> DS --> A35	0,215	0,12	1,197	0	0,155***
IN4 --> Lean --> DS --> S40	0,198	0,114	1,101	0	0,155***
IN4 --> Lean --> DS --> A33	0,216	0,12	1,031	0	0,155***
IN4 --> Lean --> L12	0,517	0,32	2,018	0	0,286***
IN4 --> Lean --> L13	0,546	0,347	1,686	0,001	0,318***
IN4 --> Lean --> L14	0,578	0,361	1,388	0,001	0,327***
IN4 --> Lean --> L15	0,634	0,406	1,515	0,001	0,345***
IN4 --> Lean --> L16	0,652	0,414	1,531	0,001	0,337***
IN4 --> Lean --> L17	0,63	0,399	1,419	0,001	0,346***
IN4 --> Lean --> L18	0,585	0,362	1,188	0,001	0,324***
IN4 --> Lean --> L19	0,546	0,332	1,218	0,001	0,292***
IN4 --> Green --> DS	0,276	0,143	0,814	0,002	0,260**
IN4 --> Green --> DS --> E31	0,276	0,143	0,814	0,002	0,260**
IN4 --> Green --> DS --> A34	0,347	0,182	1,637	0,002	0,260**
IN4 --> Green --> DS --> A36	0,376	0,193	1,733	0,002	0,260**
IN4 --> Green --> DS --> A35	0,36	0,191	1,706	0,002	0,260**

Indirect Path	Unstandardized Estimate	Lower	Upper	P-Value	Standardized Estimate
IN4 --> Green --> DS --> S40	0,332	0,177	1,784	0,002	0,260**
IN4 --> Green --> DS --> A33	0,361	0,193	1,974	0,002	0,260**
IN4 --> Green --> G23	0,525	0,283	1,392	0,002	0,293**
IN4 --> Green --> G22	0,519	0,271	1,362	0,002	0,275**
IN4 --> Green --> G21	0,526	0,275	1,358	0,002	0,282**
IN4 --> DS --> E31	-0,143	-0,457	-0,05	0,01	-0,092**
IN4 --> DS --> A34	-0,18	-0,487	-0,059	0,011	-0,109*
IN4 --> DS --> A36	-0,195	-0,57	-0,066	0,011	-0,113*
IN4 --> DS --> A35	-0,186	-0,496	-0,062	0,011	-0,111*
IN4 --> DS --> S40	-0,172	-0,478	-0,057	0,011	-0,112*
IN4 --> DS --> A33	-0,187	-0,477	-0,061	0,012	-0,116*
Lean --> DS --> E31	0,319	0,189	0,484	0,001	0,267**
Lean --> DS --> A34	0,4	0,256	0,585	0,001	0,317**
Lean --> DS --> A36	0,433	0,272	0,636	0,001	0,330**
Lean --> DS --> A35	0,415	0,256	0,629	0,001	0,324**
Lean --> DS --> S40	0,382	0,241	0,553	0,001	0,325**
Lean --> DS --> A33	0,417	0,262	0,617	0,001	0,339**
Green --> DS --> E31	0,525	0,417	0,654	0,001	0,538**
Green --> DS --> A34	0,66	0,507	0,827	0,001	0,639**
Green --> DS --> A36	0,714	0,557	0,88	0,001	0,665**
Green --> DS --> A35	0,684	0,55	0,829	0,001	0,652**
Green --> DS --> S40	0,631	0,472	0,788	0,001	0,655**
Green --> DS --> A33	0,687	0,536	0,841	0,001	0,683**

Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS utilizando la herramienta de Gaskin & Lim, (2018a) *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

5.3 Resultados del efecto mediador

La tabla 31 presenta la categorización del tipo de mediación en concordancia con los criterios utilizados por Kamble et al. (2020), de acuerdo con estos cálculos el resultado de la beta directa sin mediación es significativa ($\beta = 0,19^*$), igualmente la cifra reportada por la beta directa con mediación es significativa en presencia de L&G ($\beta = 0,392^{***}$), ($\beta = 0,791^{***}$), finalmente el efecto indirecto de IN4–L&G–DS también es significativo ($\beta = 0,155^{***}$; $\beta = 0,260^{**}$), en consecuencia L&G media parcialmente la relación entre IN4 y DS.

Tabla 31. Clasificación del tipo de mediación

Hipótesis	Coefficientes directos sin mediación	Coefficiente Beta	coeficiente directo	Coefficiente indirecto Beta	Mediación observada
IN4.0-Lean- DS	0.19*	0,392***		0,155***	Parcial
IN4.0-Green-DS	0.19*	0,791***		0,260**	Parcial

Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

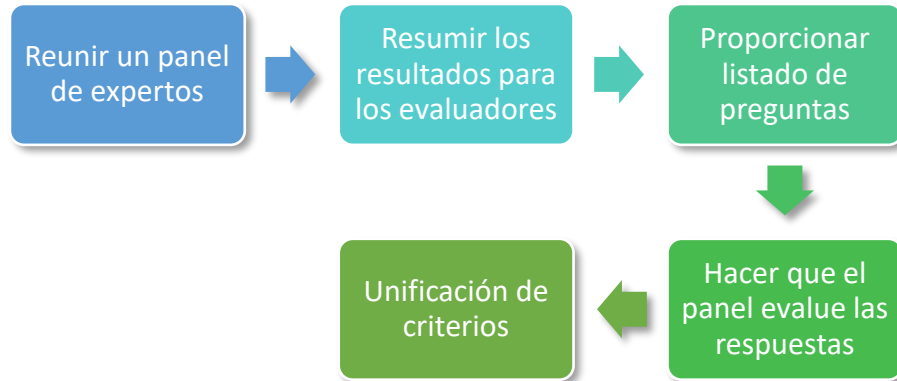
De acuerdo con la figura 58, y la tabla 29 los resultados afirman el apoyo que la IN4 brinda a L&G al tener un efecto positivo y significativo ($\beta=0,395$ ***, $\beta= ,328$ ***) actuando las tecnologías como un impulsor de las prácticas en consecuencia, tecnologías como el aprendizaje automático (Machine Learnings), realidad virtual/aumentada y los sensores se convierten en fuertes aliados de prácticas como programas para mejorar el compromiso de los trabajadores, programas de mejora continua, 5s,(clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar y hacer seguimiento), mantenimiento productivo total, método Kanban, Justo a tiempo, programa para la reducción de inventarios, equipos Kaizen, política de gestión ambiental, programa para la formación ambiental de todos los empleados y programa de las 3Rs (reducir, reutilizar y reciclar). Además, este efecto catalizador de la IN4 a L&G tiene una relación positiva y significativa en el DS ($\beta= ,392$ ***, $\beta= ,791$ ***), en consecuencia cuando las empresas manufactureras Santandereanas hacen inversiones particulares en las tecnologías y prácticas ya mencionadas impactan positivamente las métrica como: mejoramiento del retorno de la inversión ROI, disminución de los residuos (agua /o sólidos), disminución del consumo de materiales, aumento de la energía ahorrada debido a la conservación y eficiencias en la mejora, disminución de las emisiones al aire y finalmente disminución de los impactos ambientales y

riesgos para la comunidad. Contrariamente si las inversiones se realizan de forma aislada con L&G el efecto será negativo ($\beta = -0,135^*$).

5.4 Validación por juicio de expertos

Para el desarrollo de este método es necesario la estructuración de procedimientos organizados que incluyen la recolección de opiniones de expertos, el diseño de preguntas imparciales y superar limitaciones idiomáticas o de ambigüedad (Fathy et al., 2024) los enfoques estructurados para la investigación colaborativa tienen por objetivo unificar criterios de juicios de valor cualitativos individuales (Bana e Costa et al., 2023), el juicio de un experto se sustenta en el conocimiento teórico que tiene en un tema en particular (Majszak & Jebeile, 2023) siendo relevante la contribución realizada en la evaluación de la validez de las fuente de datos para el diseño de modelos por parte de los expertos (Greco et al., 2023). Para lograr este propósito se utilizó el método Delphi que permite lograr el consenso de los expertos que brindan su opinión, revisan y califican de acuerdo con sus conceptos conservando el anonimato (Hasson et al., 2000; Nichol et al., 2024) la figura 59 presenta las etapas para la aplicación de este enfoque.

Figura 59. Fases método Delphi



Nota: Método Delphi adaptado de (Kraines et al., 2020)

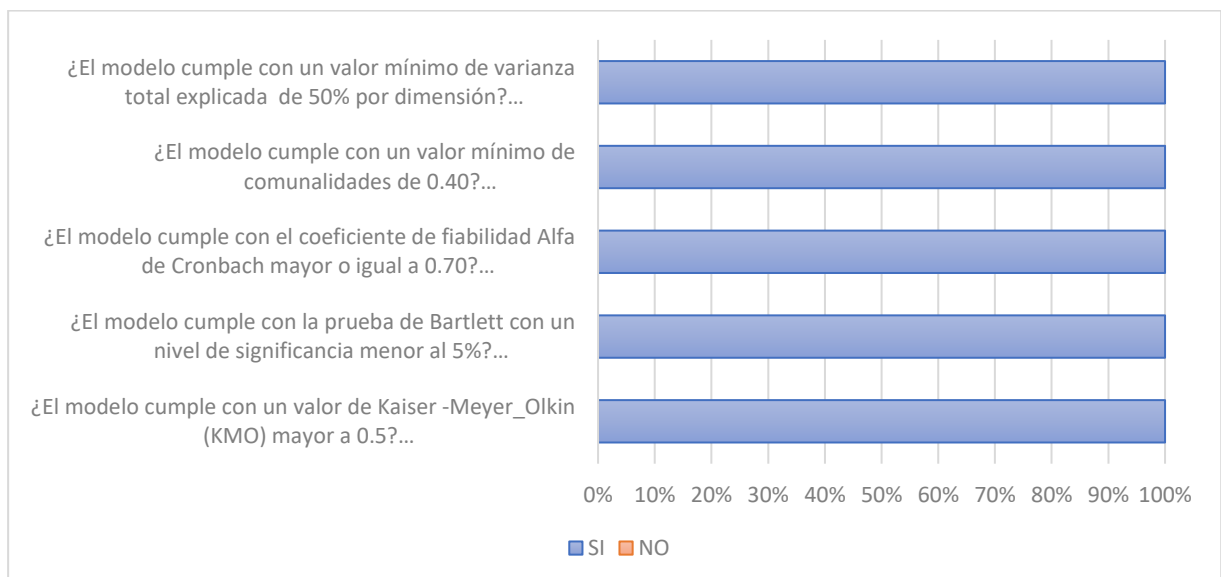
Iniciando con la primera etapa del método Delphi es necesario la conformación de un panel de expertos con un mínimo de 5 y un máximo de 20 expertos es suficiente para la estructuración de este (Belton et al., 2019; Rowe & Wright, 2001), con el objetivo de validar el modelo SEM se reunió un grupo de 6 expertos en temas tecnológicos, industriales, y estadísticos cumpliendo con este primer criterio. Una barrera en la estructuración del panel puede ser la ubicación geográfica, para vencer esta limitación se puede utilizar la internet junto con sus herramientas de comunicación (Belton et al., 2019; Boulkedid et al., 2011), con este fin se realizó un video en la plataforma youtube enviado previamente, resumiendo los resultados para los expertos; también, se diseñó un cuestionario que se suministró de forma virtual (<https://forms.gle/adJHS6xT6XN8QDBN7>) en el cual se inicia con la introducción del mismo explicando el objetivo de realizar la validación del modelo, junto con 26 preguntas las cuales se califican con una criterio binario de SI, al cumplir el cálculo con el corte mínimo de referencia y se calificaría NO si el cálculo

no cumple con el corte mínimo de referencia, además de una casilla de comentarios donde se ampliaba el criterio de clasificación, este conjunto de preguntas se encuentra distribuidas en la siguientes secciones: en la sección A conformada por 5 preguntas se valida el AFE, en la sección B se valida con 15 preguntas el modelo de medición por medio del AFC, finalmente la sección C valida el modelo estructural con 6 preguntas en el anexo 4 se presenta la encuesta.

5.4.1 Resultados validación por expertos

El proceso de consulta de opiniones de expertos respaldó los resultados presentados en el diseño del modelo SEM, la figura 60 presenta el consenso de los 6 expertos respecto al cuestionamiento sobre el cumplimiento de los cinco parámetros para la exploración inicial de los datos, calificando unánimemente con el SI cumplimiento de los criterios referenciados para un total del 100% en cada pregunta (Figura 60), ningún experto emitió la calificación de NO, por tanto se corrobora la validez del AFE.

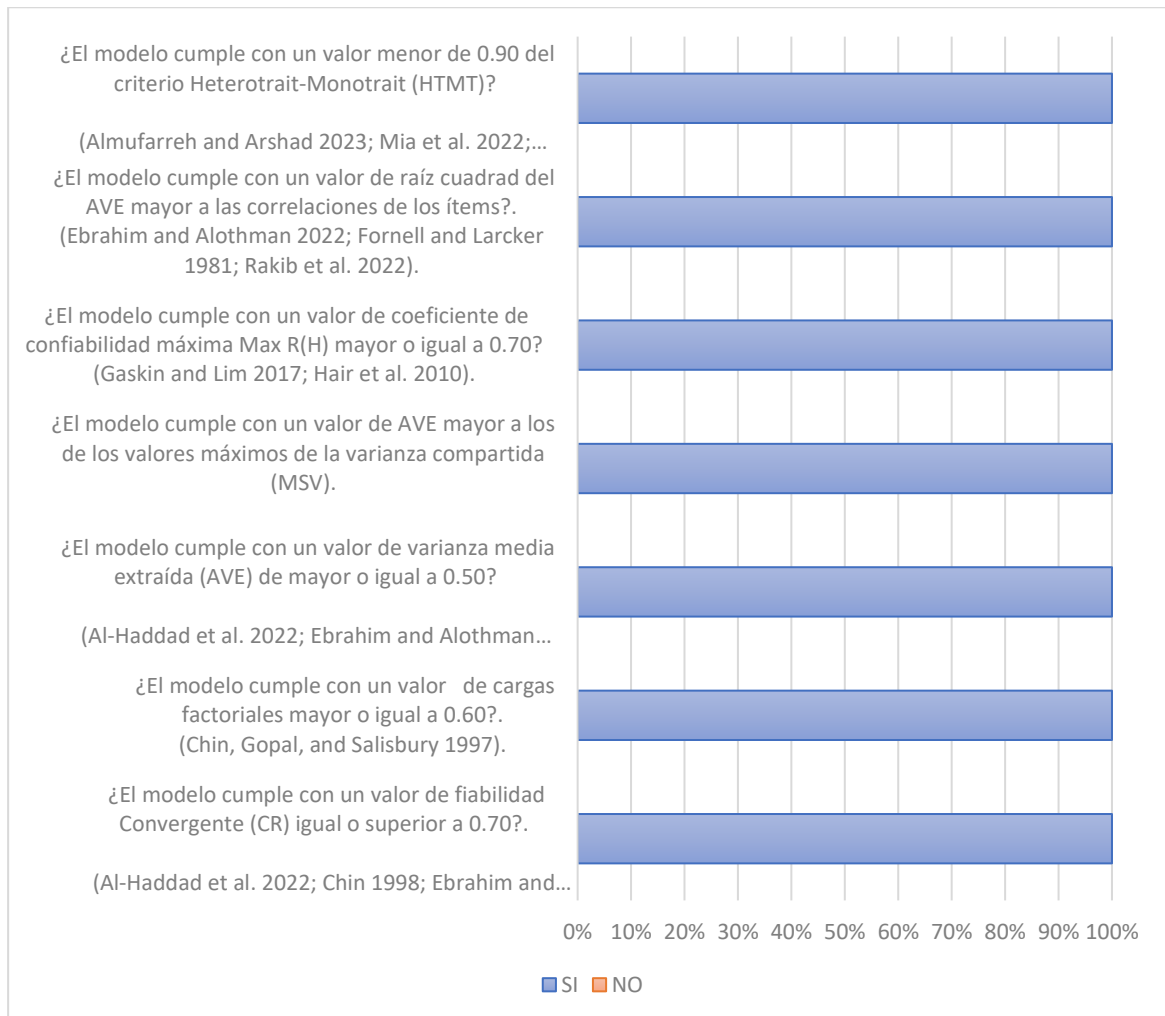
Figura 60. Validación AFE



Nota: Creación propia

También se indago sobre el AFC empezando por la fiabilidad de los constructos, por medio de los 7 criterios presentados (Figura 61), los seis expertos calificaron con un SI el cumplimiento de los criterios de fiabilidad de acuerdo con los cortes de los referentes, cumpliendo con el 100%, por otro lado; ningún experto emitió la calificación de NO, en consecuencia, se corrobora la validez del AFC.

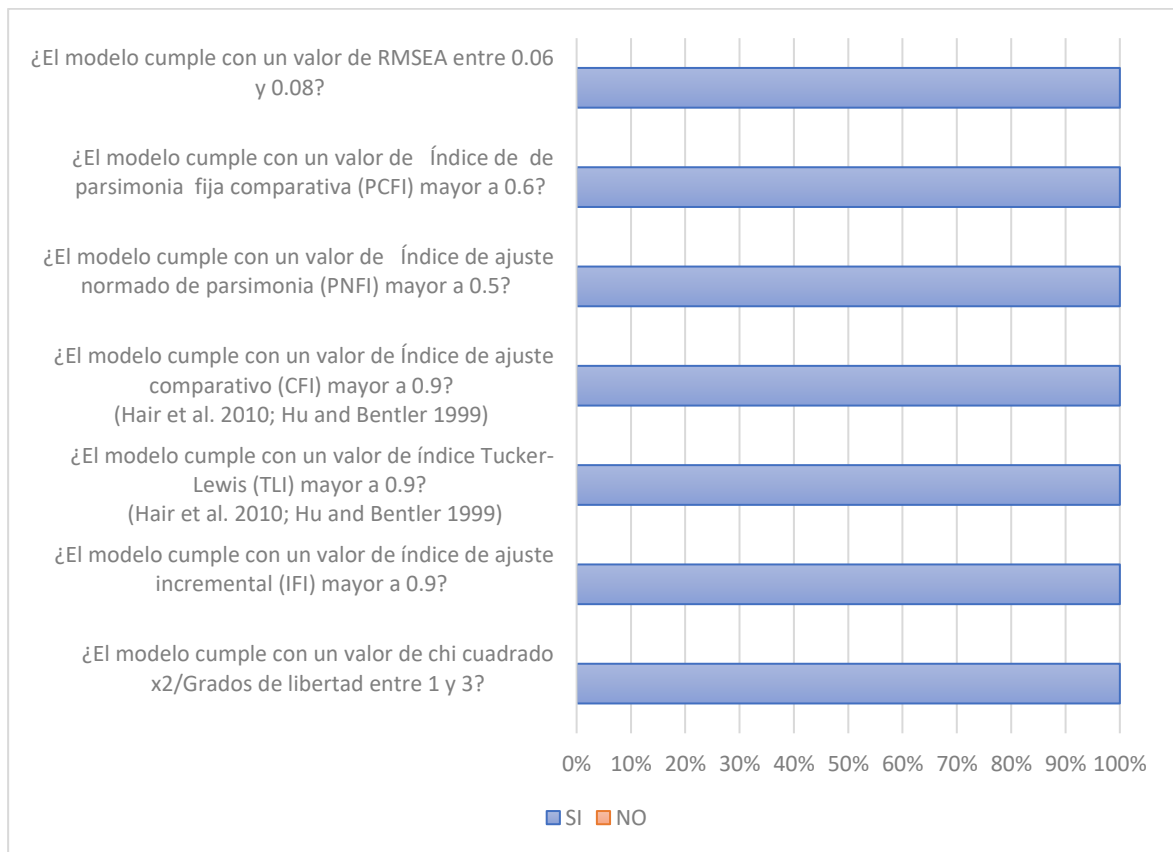
Figura 61. Validación de la fiabilidad de los constructos



Nota: Creación propia

La figura 62 ilustra el acuerdo de opiniones de los expertos entorno con la validación del modelo de medición, al indagar con el panel sobre los 7 criterios los juicios expuestos por los seis expertos fueron en consenso que cumple con un 100% con estas métricas calificando con un SI. Por otro lado, ningún experto emitió una clasificación de NO, por consiguiente, se corrobora la validez del modelo de medición.

Figura 62. Validación del modelo de medición

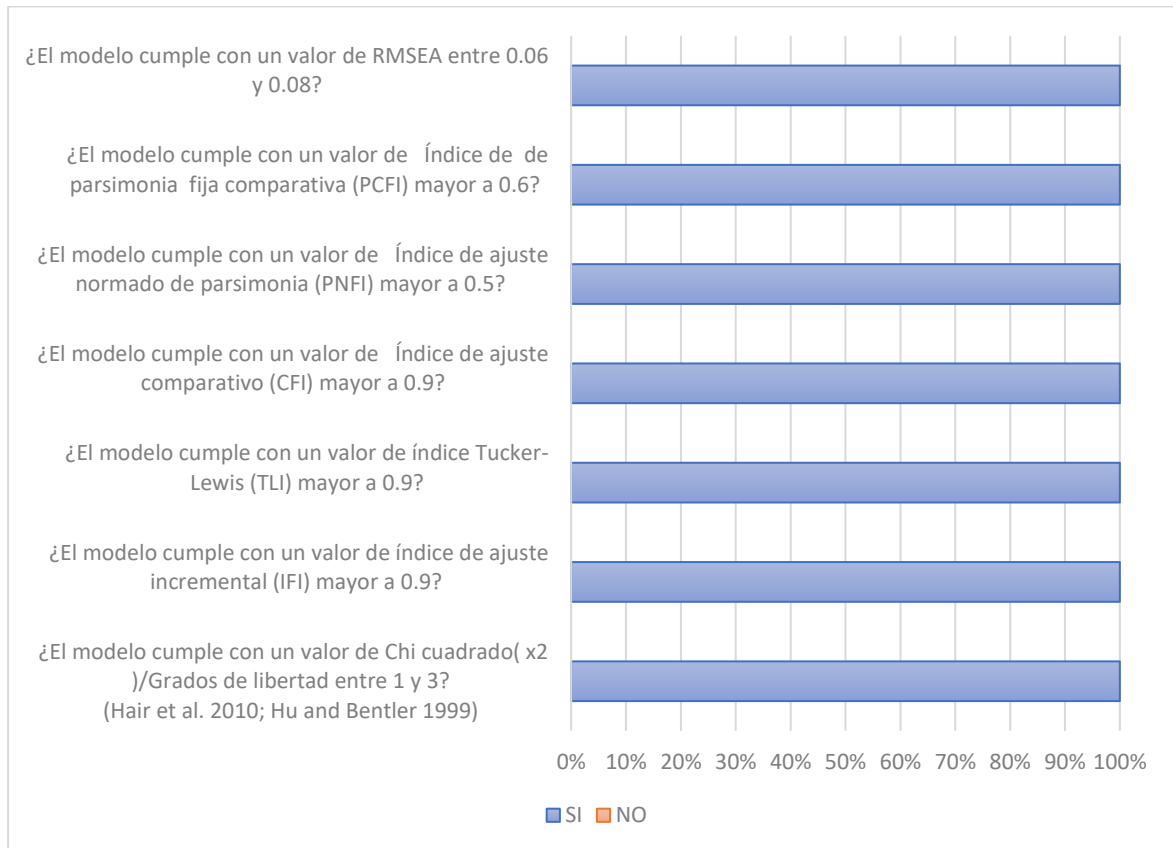


Nota: Creación propia

Finalmente, la figura 63 presenta las repuestas a los cuestionamientos sobre la validación del modelo SEM, de los 7 criterios el 100% de los expertos valido el modelo estructural de acuerdo con los datos y referencias presentadas. Ningún

experto presento una calificación de NO, por consiguiente, se corrobora la validez del modelo final.

Figura 63. Validación del modelo estructural



Nota: Creación propia

En resumen, los seis expertos consultados validaron en un 100% el procedimiento representado en los diversos cálculos estimados de acuerdo con los referentes científicos, en consecuencia, queda demostrado la idoneidad, fiabilidad y validez del modelo propuesto aplicando el método Delphi.

6. Discusión y conclusiones

En el capítulo anterior se abordó el diseño del modelo estructural la validez y confiabilidad de las métricas obtenidas del AFE y AFC, la presente sección tiene como eje central, la exposición del análisis, demostración y comprensión de los resultados teniendo como insumo los datos obtenidos en el aparte anterior. Este capítulo 6 está dividido en cinco secciones, en primer lugar, se analizó los resultados generales del modelo global, seguidamente los resultados del modelo de mediación en tercer lugar la discusión de los resultados de las hipótesis, seguidamente las implicaciones prácticas, finalmente las limitaciones y recomendaciones futuras para la realización de otras investigaciones.

6.1 Análisis de resultados del modelo global

Los resultados de los hallazgos presentan una fuerte relación entre las variables latentes y los constructos del modelo medido por el criterio de Fornell & Larcker. (1981) , lo anterior se evidencia expuesto en la tabla 19 en donde se demuestra en los valores de los constructos IN4, Lean, Green y DS presentan medidas de $CR > 0.70$; también las cifras reportadas por el AVE son próximas y mayores a 0.50, estando en el umbral cuando se compara con el MSV ($AVE > MSV$), el coeficiente reportado por los constructos en el indicador Max R(H) es > 0.70 , además la raíz cuadrada de los constructos del AVE que son los valores ubicados en las diagonales son mayores a los valores de las correlaciones de los ítems que son las cifras que se encuentran debajo de esta columna, ejemplo de lo anterior en el constructo Lean el AVE reportado es de 0.669 la raíz cuadrada es de 0.81, los valores correlacionados que se encuentran por debajo de esta cifra son menores,

caso similar se presentó variables latentes, Lean Green y DS. Por tanto, cumplen los criterios de Fornell & Larcker. (1981) demostrando la confiabilidad y validez de los constructos (Pervan et al., 2017). También se aplicó el enfoque HTMT de validez discriminante en donde al presentar los constructos IN4, Lean; Green y DS valores menores a 0.90 se puede afirmar que los constructos son diferentes en el mismo contexto científico de mostrando suficientes nociones de discriminación (Almufarreh & Arshad, 2023b; Naveed et al., 2020; Waqar et al., 2023b). Los hallazgos previos son compatibles con los expuestos en la tabla 21 en donde los constructos Lean <--- IN_4, Green <--- IN_4; DS <--- Lean; DS <--- Green; DS <--- IN_4 presentan valores críticos >1.96.

6.2 Análisis de bondad de ajuste del modelo de ecuaciones estructurales

De acuerdo con los datos ilustrados en la tabla 23 y 24 los siete indicadores de bondad de ajuste presentados en el modelo de medición y estructural están en línea con los parámetros generales de investigación, por tanto, el modelo esta adecuadamente diseñado y estructurado presentando un buen ajuste (Sun et al., 2023), los indicadores de bondad de ajuste permiten analizar la precisión de la información del modelo para establecer si es óptimo y sirve para los objetivos de la investigación (Escobedo Portillo et al., 2016), estos resultados de los índices concuerdan con los presentados por Qi et al. (2023). Además, la validación del modelo con el método Delphi aplicado a los 6 expertos parametrizado en las figuras 60, 61, 62 y 63 corroboraron los resultados estadísticos.

6.3 Discusión y resultados de las hipótesis

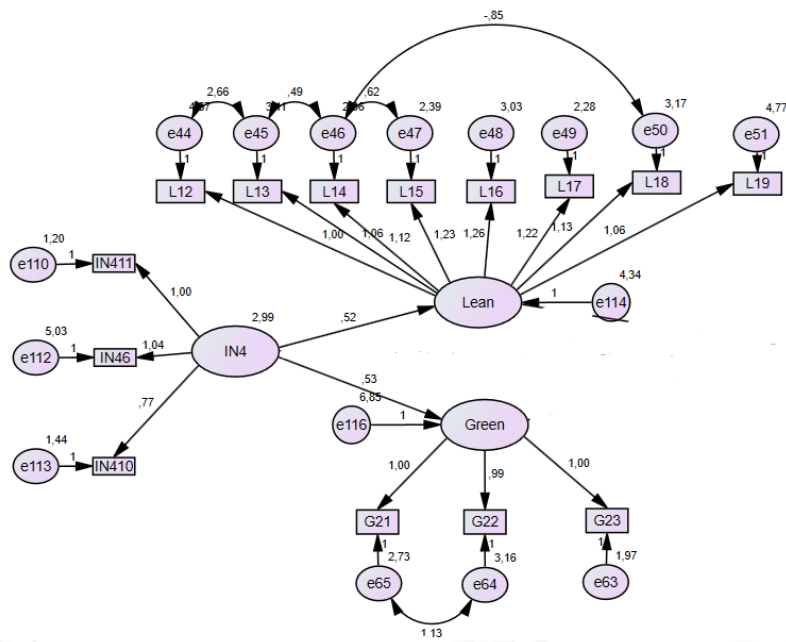
Teniendo en cuenta el marco conceptual desarrollado el método de mediación aplicado y los resultados obtenidos, a continuación, se presentan, la discusión para las hipótesis planteadas en la tabla 31 figura 58; para realizar este procedimiento se utilizó la técnica estadística Bootstrapping con 2000 muestras

6.3.1 Hipótesis 1

H1a; H1b La Industria 4.0 tiene una influencia positiva y directa sobre Lean & Green, de acuerdo con la figura 64 junto con la tabla 25, se puede evidenciar un efecto positivo y significativo analizando los estimadores no estandarizados Lean \leftarrow IN4 ($\beta = 0,517^{***}$); Green \leftarrow IN4($\beta = 0,5216^{***}$), en donde la implementación de tecnología explica directamente las practicas L&G de acuerdo con los coeficientes de regresión por cada unidad de incremento de IN4 L&G aumenta 0.51 y 0.52. La figura 65, junto con la tabla 26 presenta los estimadores estandarizados, en donde se puede analizar un efecto positivo y significativo Lean \leftarrow IN4 ($\beta = 0,39^{***}$); Green \leftarrow IN.4($\beta = 0,33^{***}$), cuando las tecnologías asociadas a IN4 incrementan en una unidad de desviación estándar L&G incrementa 0.39 y 0.33; por tanto, se acepta H1a y H1b, estos hallazgos afirman el apoyo que la IN4 brinda a L&G al tener un efecto positivo y significativo, actuando las tecnologías como un impulsor de las prácticas en consecuencia, tecnologías como el aprendizaje automático (Machine Learnings), realidad virtual/ aumentada y los sensores se convierten en fuertes aliados de prácticas como programas para mejorar el compromiso de los trabajadores, programas de mejora continua, 5s,(clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar y hacer seguimiento), mantenimiento productivo total,

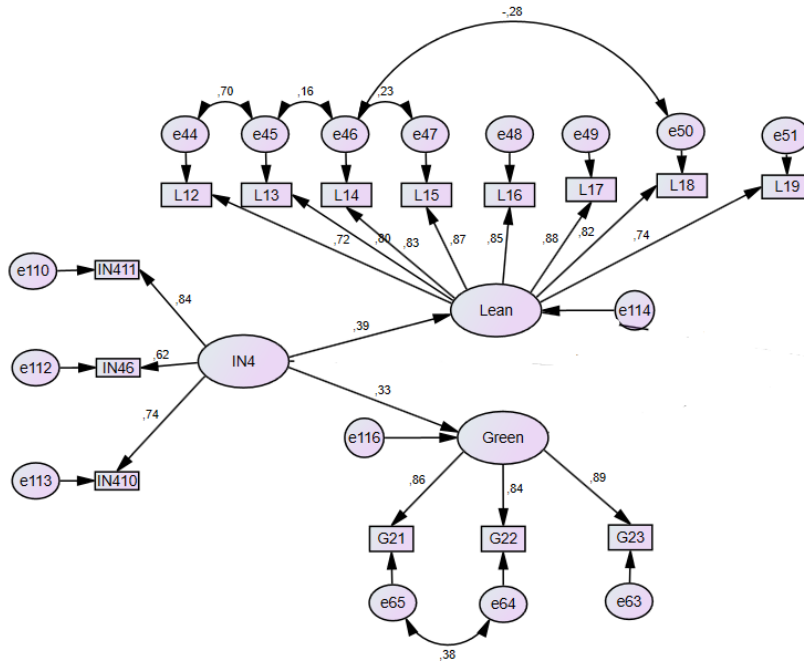
método Kanban, Justo a tiempo, programa para la reducción de inventarios, equipos Kaizen, política de gestión ambiental, programa para la formación ambiental de todos los empleados y programa de las 3Rs (reducir, reutilizar y reciclar).

Figura 64. Estimadores no estandarizados H1



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** p < 0.001 ** p < 0.010; * < 0.05

Figura 65. Estimadores estandarizados H1



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** $p < 0.001$ ** $p < 0.010$; * <0.05

6.3.2 Hipótesis 2

H2a; H2b: Existe una influencia mediadora de Lean & Green, entre la Industria 4.0 y el desempeño sostenible. Para calcular y probar el tipo de mediación se utilizó el procedimiento utilizado por Perez et al. (2023), en concordancia con Kamble et al. (2020) existen tres posibles resultados del análisis de mediación: Sin mediación cuando los efectos directos e indirectos son insignificantes, igualmente cuando el efecto directo de la variable independiente hacia la mediadora y de la mediadora hacia la independiente no son significativos, se presenta mediación parcial cuando los efectos directos e indirectos de la variable independiente hacia la dependiente en presencia de la mediadora son significativos, finalmente existe mediación total cuando el efecto directo de la variable independiente hacia la dependiente en

presencia de la mediadora no es significativo y el efecto indirecto de la variable independiente hacia la dependiente es significativo (S. Kamble et al., 2020).

Además, se estimó el nivel de significancia para las betas directas sin mediación y con mediación (Tabla 29-30), de acuerdo con la figura 58 los estimadores estandarizados directos DS <--- Lean ($\beta = 0,39^{***}$); DS <--- Green ($\beta = 0,79^{***}$), cuando Lean aumenta una unidad de desviación estándar DS lo hace en 0.39, igualmente cuando Green aumenta una unidad de desviación estándar DS lo hace en 0.79. El efecto indirecto estandarizados DS <--- Lean ($\beta = 0,155^{***}$); DS <--- Green ($\beta = 0,26^{***}$, $p < 0,1\%$) (Tabla 31), por tanto, existe mediación parcial de L&G entre IN4 y DS aceptándose H2a y H2b. Estos hallazgos afirman el apoyo que la IN4 brinda a L&G al tener un efecto positivo y significativo, actuando las tecnologías como un impulsor de las prácticas en consecuencia, tecnologías como el aprendizaje automático (Machine Learnings), realidad virtual/ aumentada y los sensores se convierten en fuertes aliados de prácticas como programas para mejorar el compromiso de los trabajadores, programas de mejora continua, 5s, (clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar y hacer seguimiento), mantenimiento productivo total, método Kanban, Justo a tiempo, programa para la reducción de inventarios, equipos Kaizen, política de gestión ambiental, programa para la formación ambiental de todos los empleados y programa de las 3Rs (reducir, reutilizar y reciclar), tienen un efecto positivo en el DS en métricas como: mejoramiento del retorno de la inversión ROI, disminución de los residuos (agua /o sólidos), disminución del consumo de materiales, aumento de la energía ahorrada debido a la conservación y eficiencias en la mejora, disminución de las emisiones

al aire y finalmente disminución de los impactos ambientales y riesgos para la comunidad. Los hallazgos presentados concuerdan con el estudio de Sharma et al. (2024) en donde es fundamental la mediación de Lean entre la IN4 y el DS de forma simétrica como estrategia relevante para la mejorar el desempeño (Sharma et al., 2024).

6.3.3 Hipótesis 3

H3 La Industria 4.0 tiene un impacto directo y positivo en el desempeño sostenible. La figura 58 junto con la tabla 29 presentan los coeficientes estandarizados la relación entre DS \leftarrow IN4 ($\beta = -0,135^*$); cuando las tecnologías asociadas a IN4 aumentan 1 unidad el DS disminuye -0.135 por tanto existe un efecto negativo y directo de la IN4 en el DS. Lo anterior concuerda con los hallazgos presentados por S. Kamble et al. (2020), el efecto de la IN4 al DS se maximiza cuando el

desarrollo de los colaboradores se considera como estrategia fundamental para la implementación de tecnologías base primordial de la filosofía Lean, sin embargo, si las empresas deciden implementar la IN4 de forma aislada de Lean o sin contar primero con las prácticas, lo anterior podría no ser tan efectivo para el DS (S. Kamble et al., 2020). Por tanto, la implementación de tecnologías como el aprendizaje automático (Machine Learnings), realidad virtual/ aumentada y los sensores sin el conjunto de prácticas L&G estudiadas tienen un efecto negativo en las métricas de DS como mejoramiento del retorno de la inversión ROI, disminución de los residuos (agua /o sólidos), disminución del consumo de materiales, aumento de la energía ahorrada debido a la conservación y eficiencias en la mejora,

disminución de las emisiones al aire y finalmente disminución de los impactos ambientales y riesgos para la comunidad en el sector manufactura Santandereano.

6.4 Conclusiones

6.4.1 Alcance teórico

Los resultados de este estudio revelan que la IN4 está relacionada positiva y significativamente con las prácticas L&G, estos hallazgos son consistentes con los presentados por (Bag et al., 2021; Bhagat et al., 2022; Rehman Khan et al., 2021; Umar et al., 2022b), la IN4 se convierte en un catalizador para L&G tecnologías como machine learnigs, realidad virtual y aumentada y el uso de sensores ayudan al mejor desarrollo de L&G (H1a; H1b). Congruentemente existe una influencia positiva entre la IN4 y DS mediada por L&G lo anterior es acorde con los resultados de Kamble et al. (2020); Lu et al. (2020a), siendo más fuerte la relación entre la IN4 y DS cuando se incluyen en las empresas las prácticas de producción limpia L&G (H2a; H2b). Sin embargo, existe un efecto negativo y directo entre la IN4 y el DS de acuerdo con Kamble et al. (2020), por tanto, se evidencia la importancia de conjugar las tecnologías asociadas con la IN4 con L&G para potencializar el DS.

Este estudio planteo tres preguntas de investigación

- I. ¿Cuál es el efecto directo de la industria 4.0 en las prácticas Lean & Green?
- II. ¿Cuál es efecto indirecto entre la Industria 4.0 y el desempeño sostenible desde la perspectiva del triple resultado teniendo como variable medidora las prácticas Lean & Green?
- III. ¿Cuál es el efecto directo de la industria 4.0 en el desempeño sostenible desde la perspectiva del triple resultado?

Estas preguntas fueron respondidas logrando los siguientes objetivos de investigación. Un objetivo general encaminado a determinar el efecto de la Industria 4.0 y las prácticas Lean & Green en el desempeño sostenible del sector manufactura en el departamento de Santander. Lo enunciado anteriormente, estaba apoyado por tres propósitos específicos que buscaban Identificar las variables que definen mejor el efecto de la Industria 4.0 y Lean & Green en el desempeño sostenible del sector manufactura, diseñar un modelo de ecuaciones estructurales para evaluar el efecto de la Industria 4.0 y Lean & Green en el desempeño sostenible y finalmente la validación del modelo propuesto. Todos los objetivos se han alcanzado con éxito, el primer objetivo se consigue con la realización de estudio bibliométrico y RSL (capítulo 2 y 3), el segundo objetivo se consigue con la realización del AF y AFC, finalmente el tercer objetivo se alcanzó con la validación de las tres hipótesis planteadas (capítulo 5). En la tabla 32 junto con la figura 66 se presenta un resumen del estudio de las hipótesis.

Tabla 32. Contraste de hipótesis

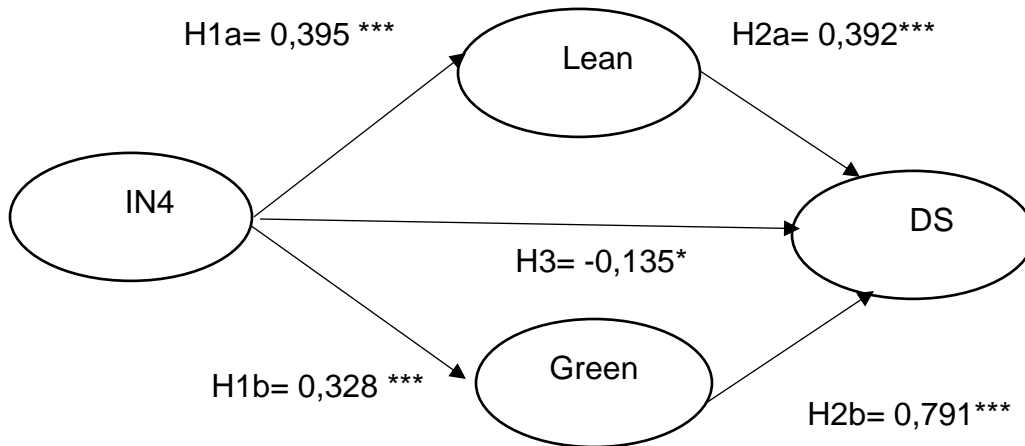
	Hipótesis	Beta estandarizada	Resultado de la prueba
H1a; H1b	La Industria 4.0 tiene una influencia positiva y directa sobre Lean & Green,	Lean<---IN_4=0,395 ***Green<---IN_4= 0,328 ***	Aceptada
H2a; H2b	Existe una influencia mediadora de Lean & Green, entre la Industria 4.0 y el desempeño sostenible	DS <--- Lean= 0,392*** DS <---Green=0,791***	Aceptada
H3	La industria 4.0 tiene un impacto directo y positivo en el desempeño sostenible	DS <--- IN4=-,135 *	Rechazada

Nota: Análisis de significancia *** p < 0.001 ** p < 0.010

Finalmente, se cerró la brecha científica planteada por Beltrami et al. (2021), mencionando sobre las escasas investigaciones de corte empírico con enfoque cuantitativo que ayuden con la construcción de teoría que aborden la relación entre la IN4, prácticas de producción limpia y las dimensiones económicas, sociales y

ambientales del DS de forma integrada, al ser este el primer documento que estudia el efecto mediador de L&G ente la IN4 y el DS diseñando un modelo SEM.

Figura 66. *Resumen hipótesis*



Nota: Creación propia de acuerdo con los datos AMOS *** $p < 0.001$ ** $p < 0.010$; * < 0.05

De acuerdo con la tabla 32 y la figura 66 se demuestran las hipótesis H1a y H1b existiendo un efecto facilitador de las tecnologías hacia L&G lo anterior permite aceptar las hipótesis planteadas. Igualmente se identificó que la anterior sinergia mediadora entre IN4 hacia DS por medio de L&G es parcial. En este estudio se encontró una fuerte evidencia de la mejora en el DS cuando se invierte en tecnologías y L&G, por tanto, se acepta H2a y H2b. Sin embargo teniendo en cuenta la hipótesis inicial tres que menciona el efecto positivo directo de IN4 hacia DS el análisis de datos presenta un valor negativo y significativo, lo anterior significa que existe un detrimento en las métricas del DS cuando se invierte en tecnologías sin L&G, en consecuencia se rechaza H3.

6.5 Implicaciones teóricas

La literatura existente ha encontrado una fuerte relación entre la IN4 y L&G de forma individual, esta investigación pretende analizar en conjunto la IN4 junto con L&G y su impacto en el DS, de acuerdo con la actualización realizada al análisis bibliométrico con fecha 2024 no existen estudios que apliquen SEM para explorar la relación entre IN4, L&G y DS, por tanto, este es el primer estudio que utiliza un método robusto de la estadística multivariada en un contexto de país de economía emergente. Por otro lado, la evolución teórica se está presentando de acuerdo con los hallazgos de la figura 21(temas motores) hacia temas emergentes como la industria 5.0 (IN5), relacionada específicamente con IoT, un tópico que se encuentra próximo a convertirse en tema motor en la medida en que aumenten las investigaciones es la relación entre L&G con tecnologías, igualmente los pequeños círculo en el conjunto de economía circular con prácticas verdes y desarrollo sostenible y el de Lean manufacturing IN4 y sostenibilidad, comenzaran a reducir su distancia convirtiéndose en una sola circunferencia lo que significaría que aumento los estudios al alrededor de estos paradigmas

6.6 Alcance gerencial

Los resultados de este estudio indican que las inversiones realizadas en IN4, junto con la incorporación de prácticas de producción limpia como L&G mejoran el DS, $H2a = 0,392^{***}$; $H2b = 0,791^{***}$ teniendo mayor efecto positivo en las prácticas Green que Lean, en contraste si se implementan solo las tecnologías $H3 = -0,135$, lo anterior brinda un panorama a las empresas Santandereanas del sector manufactura, sobre la importancia de integrar departamentos como el de TICS,

calidad y gestión ambiental, lo anterior potencializa las inversiones realizadas en estas secciones mejorando el DS y por ende la sostenibilidad. Por tanto, se recomienda, que las empresas implementen tecnologías de la industria 4.0 junto con L&G para lograr mejorar sus métricas sostenibles. Los hallazgos de este estudio presentaron como el conjunto de tecnologías realidad virtual /aumentada, machine learnings y los sensores constituyen un potente aliado para la estrategia de producción limpia L&G conformado por las prácticas internas como los programas para la mejora del compromiso de los colaboradores, la mejora continua, los equipos Kaizen, las 5S, mantenimiento productivo total, el método Kanban, JIT, programa para la reducción de inventarios, además de la política de gestión ambiental, programa para la gestión ambiental de los trabajadores y las 3Rs, la anterior estrategia tendrá un efecto positivo en el DS conformado por las métricas de retorno de la inversión por sus siglas en inglés (ROI), disminución del consumo de materiales, disminución en las emisiones del aire, aumento en la energía ahorrada como consecuencia de las eficiencias en mejora, disminución de los residuos de agua/ sólido y disminución de los impactos ambientales y riesgo para las comunidades. El análisis estadístico permitirá a los tomadores de decisiones evaluar la efectividad de las inversiones en tecnologías y L&G bajo estos parámetros de desempeño, este camino estratégico diseñado en esta investigación acortara la distancia que existe entre las empresas Santandereanas de manufactura con el triple resultado, orientándolas en la dirección que con lleva al cumplimiento de los ODS, para resguardar los recurso que necesitan para subsistir las generaciones actuales y futuras, impulsándolas a convertirse en empresas

reconocidas por el aporte de valor a los diferentes grupos de interés llevándolas inclusive a convertirse de forma voluntaria en BIC.

Además se demostró un camino que no deben tomar los manufactureros Santandereanos y es el de implementar solo tecnologías sin acompañamiento de prácticas L&G, la implementación IN4 en las empresas siempre se considerara un reto generando barreras y resistencia a los cambios, se tiene la concepción en la industria que la implementación de sola tecnología mejorara el desempeño sostenible, lo anterior se refuta con un efecto negativo en el desempeño, por tanto, si los industriales deciden seguir en esta dirección colocaran en riesgo la estabilidad de la compañía, la preservación de los recursos naturales y no aportará para el cumplimiento de los ODS.

6.6 Limitaciones y futuras líneas de investigación

Esta investigación no está exenta de limitaciones, las cuales las más importantes se presentan a continuación:

Se utilizaron datos de corte transversal tomados en los años 2022-2023 correspondientes con la percepción de gerentes, supervisores y operarios en Santander pertenecientes el sector manufactura, lo cual no permite analizar cambios en el tiempo limitando los resultados para dicho contexto tiempo y sector, los empresarios colombianos por su cultura reservada son cautos en el momento de dar información pensando que puede ser usada para propósitos no científicos. Se limito el método de validación del modelo a ecuaciones estructurales, por tanto, futuros trabajos se pueden realizar en otros contextos geográficos internacionales y nacionales donde los empresarios tengan una cultura más abierta con la entrega

de la información. Además, el modelo conceptual junto con los resultados puede ser validados por otros métodos de investigación como el estudio de caso o métodos combinados como el SEM junto con la inteligencia artificial (SEM-IA) para contrastar los resultados.

Referencias

- Abdelkareem, R. S., Mady, K., Lebda, S. E., & Elmantawy, E. S. (2024). The effect of green competencies and values on carbon footprint on sustainable performance in healthcare sector. *Cleaner and Responsible Consumption*, 12, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100179>
- Abuelfaraa, W., Salonitis, K., Al-Ashaab, A., & Ala'raj, M. (2020). Lean-Green Manufacturing Practices and Their Link with Sustainability: A Critical Review. *Sustainability*, 12(3), 981. <https://doi.org/10.3390/su12030981>
- Afum, E., Sun, Z., Agyabeng-Mensah, Y., & Baah, C. (2021). Lean production systems, social sustainability performance and green competitiveness: the mediating roles of green technology adoption and green product innovation. *Journal of Engineering, Design and Technology*.
- Ahmad, S., Wasim, S., Irfan, S., Gogoi, S., Srivastava, A., & Farheen, Z. (2019). Qualitative v/s. quantitative research-A summarized review. *Journal of Evidence Based Medicine and Healthcare*, 6(43), 2828–2832.
- Akudugu, M. A., & Ogwu, M. C. (2024). Sustainable development policies and interventions: A bibliometric analysis of the contributions of the academic

- community. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139919.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139919>
- Alayón, C., Säfsten, K., & Johansson, G. (2017). Conceptual sustainable production principles in practice: Do they reflect what companies do? *Journal of Cleaner Production*, 141, 693–701.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.079>
- Al-Haddad, S., Sharabati, A.-A. A., Al-Khasawneh, M., Maraqa, R., & Hashem, R. (2022). The Influence of Corporate Social Responsibility on Consumer Purchase Intention: The Mediating Role of Consumer Engagement via Social Media. *Sustainability*, 14(11), 6771. <https://doi.org/10.3390/su14116771>
- Alhammadi, A., Alsyof, I., Semeraro, C., & Obaideen, K. (2024). The role of industry 4.0 in advancing sustainability development: A focus review in the United Arab Emirates. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100708.
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100708>
- Almufarreh, A., & Arshad, M. (2023a). Exploratory Students' Behavior towards Massive Open Online Courses: A Structural Equation Modeling Approach. *Systems*, 11(5), 223. <https://doi.org/10.3390/systems11050223>
- Almufarreh, A., & Arshad, M. (2023b). Exploratory Students' Behavior towards Massive Open Online Courses: A Structural Equation Modeling Approach. *Systems*, 11(5), 223. <https://doi.org/10.3390/systems11050223>
- Alves, A. C. (2022). Lean Thinking: An Essential Mindset. *IEEE Engineering Management Review*, 50(4), 127–133.
<https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3215062>

-
- Amjad, M. S., Rafique, M. Z., Hussain, S., & Khan, M. A. (2020). A new vision of LARG Manufacturing — A trail towards Industry 4.0. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 377–393.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.06.012>
- Amjad, M. S., Rafique, M. Z., & Khan, M. A. (2021a). Leveraging Optimized and Cleaner Production through Industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 859–871. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.001>
- Amjad, M. S., Rafique, M. Z., & Khan, M. A. (2021b). Leveraging Optimized and Cleaner Production through Industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 859–871. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.001>
- Amjad, M. S., Rafique, M. Z., & Khan, M. A. (2021c). Modern divulge in production optimization: an implementation framework of LARG manufacturing with Industry 4.0. *International Journal of Lean Six Sigma*, 12(5), 992–1016.
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-07-2020-0099>
- Amjad, M. S., Rafique, M. Z., & Khan, M. A. (2021d). Modern divulge in production optimization: an implementation framework of LARG manufacturing with Industry 4.0. *International Journal of Lean Six Sigma*, 12(5), 992–1016.
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-07-2020-0099>
- Amofah, D. O., & Chai, J. (2022). Sustaining Consumer E-Commerce Adoption in Sub-Saharan Africa: Do Trust and Payment Method Matter? *Sustainability*, 14(14), 8466. <https://doi.org/10.3390/su14148466>

-
- Andersen, O., & Kheam, L. S. (1998). Resource-based theory and international growth strategies: an exploratory study. *International Business Review*, 7(2), 163–184.
- ANDI. (2019). informe encuesta transformación digital 2019. In *informe encuesta transformación digital 2019*.
<https://www.andi.com.co//Uploads/ANALISIS%20-%20ENCUESTA%20DE%20TRANSFORMACI%C3%93N%20DIGITAL%202019%20-%20ANDI.pdf>
- Arana-Landín, G., Uriarte-Gallastegi, N., Landeta-Manzano, B., & Laskurain-Iturbe, I. (2023). The Contribution of Lean Management—Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency. *Energies*, 16(5), 2124.
<https://doi.org/10.3390/en16052124>
- Awad, M. M., Hashem, A., & Naguib, H. M. (2022). The Impact of Lean Management Practices on Economic Sustainability in Services Sector. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159323>
- Azevedo, S. G., Carvalho, H., Duarte, S., & Cruz-Machado, V. (2012). Influence of Green and Lean Upstream Supply Chain Management Practices on Business Sustainability. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 59(4).
<https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2189108>
- Bag, S., Rahman, M. S., Srivastava, G., Shore, A., & Ram, P. (2023). Examining the role of virtue ethics and big data in enhancing viable, sustainable, and digital supply chain performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122154>

-
- Bag, S., Yadav, G., Dhamija, P., & Kataria, K. K. (2021). Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125233.
- Bana e Costa, C. A., Oliveira, M. D., Vieira, A. C. L., Freitas, L., Rodrigues, T. C., Bana e Costa, J., Freitas, Â., & Santana, P. (2023). Collaborative development of composite indices from qualitative value judgements: The EURO-HEALTHY Population Health Index model. *European Journal of Operational Research*, 305(1), 475–492.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.05.037>
- Barney, J. (1991). Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.
- Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 51(6), 1173.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: *International Journal of Production Economics*, 55(3). [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
- Belton, I., MacDonald, A., Wright, G., & Hamlin, I. (2019). Improving the practical application of the Delphi method in group-based judgment: A six-step

- prescription for a well-founded and defensible process. *Technological Forecasting and Social Change*, 147, 72–82.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.07.002>
- Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., & Sartor, M. (2021). Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. *Journal of Cleaner Production*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>
- Benešová, A., Basl, J., Tupa, J., & Steiner, F. (2021). Design of a business readiness model to realise a green industry 4.0 company. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(9), 920–932.
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1946858>
- Benkhati, I., Belhadi, A., Kamble, S. S., & Ezahra Touriki, F. (2022). Linkages between smart, lean, and resilient manufacturing for sustainable development. *Business Strategy and the Environment*.
<https://doi.org/10.1002/bse.3322>
- Benkhati, I., Belhadi, A., Kamble, S. S., & Ezahra Touriki, F. (2023). Linkages between smart, lean, and resilient manufacturing for sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 32(6), 3689–3704.
<https://doi.org/10.1002/bse.3322>
- Bhagat, P. R., Naz, F., & Magda, R. (2022). Role of Industry 4.0 Technologies in Enhancing Sustainable Firm Performance and Green Practices. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(8), 229–248.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85138993490&partnerID=40&md5=7d1f6157b5bdf04634976495ea987e0e>

-
- Bhattacharya, A., Nand, A., & Castka, P. (2019a). Lean-green integration and its impact on sustainability performance: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117697>
- Bhattacharya, A., Nand, A., & Castka, P. (2019b). Lean-green integration and its impact on sustainability performance: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117697>
- Bianco, D., Godinho Filho, M., Osiro, L., & Ganga, G. (2023a). Unlocking the Relationship Between Lean Leadership Competencies and Industry 4.0 Leadership Competencies: An ISM/Fuzzy MICMAC Approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1–25. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3069127>
- Bianco, D., Godinho Filho, M., Osiro, L., & Ganga, G. M. D. (2023b). Unlocking the Relationship Between Lean Leadership Competencies and Industry 4.0 Leadership Competencies: An ISM/Fuzzy MICMAC Approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(6), 2268–2292. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3069127>
- Bortolini, M., Calabrese, F., Galizia, F. G., & Mora, C. (2022). A three-objective optimization model for mid-term sustainable supply chain network design. *COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108131>
- Bose, S., Khan, H. Z., & Bakshi, S. (2024). Determinants and consequences of sustainable development goals disclosure: International evidence. *Journal of*

-
- Cleaner Production*, 434, 140021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140021>
- Boukdedid, R., Abdoul, H., Loustau, M., Sibony, O., & Alberti, C. (2011). Using and reporting the Delphi method for selecting healthcare quality indicators: a systematic review. *PloS One*, 6(6), e20476.
- Braccini, A. M., & Margherita, E. G. (2019). Exploring organizational sustainability of industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company. *Sustainability*, 11(1), 36.
- Brey, P., & Søraker, J. H. (2009). Philosophy of Computing and Information Technology. In *Philosophy of Technology and Engineering Sciences* (pp. 1341–1407). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51667-1.50051-3>
- Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291–294.
- Buer, S.-V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2924–2940.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
- Cardinali, P. G., & De Giovanni, P. (2022). Responsible digitalization through digital technologies and green practices. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. <https://doi.org/10.1002/csr.2249>
- Carvalho, H., Azevedo, S., & Cruz-Machado, V. (2014). *Trade-offs among Lean, Agile, Resilient and Green Paradigms in Supply Chain Management: A Case*

- Study Approach* (pp. 953–968). https://doi.org/10.1007/978-3-642-40081-0_81
- Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., & Oliveira, T. (2019). Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry, 107*, 22–32.
- Castiglione, C., Pastore, E., & Alfieri, A. (2022). Technical, economic, and environmental performance assessment of manufacturing systems: the multi-layer enterprise input-output formalization method. *Production Planning and Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2054743>
- Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Belhadi, A., Kamble, S. S., & Elbaz, J. (2021). A readiness self-assessment model for implementing green lean initiatives. *Journal of Cleaner Production, 309*, 127401. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127401>
- Chin, W. W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. *Modern Methods for Business Research, 295*(2), 295–336.
- Chin, W. W., Gopal, A., & Salisbury, W. D. (1997). Advancing the theory of adaptive structuration: The development of a scale to measure faithfulness of appropriation. *Information Systems Research, 8*(4), 342–367.
- Cifone, F. D., Hoberg, K., Holweg, M., & Staudacher, A. P. (2021). ‘Lean 4.0’: How can digital technologies support lean practices? *International Journal of Production Economics, 241*, 108258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108258>

-
- Ciliberto, C., Szopik-Depczynska, K., Tarczynska-Luniewska, M., Ruggieri, A., & Ioppolo, G. (2021). Enabling the Circular Economy transition: a sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0. *BUSINESS STRATEGY AND THE ENVIRONMENT*, 30(7), 3255–3272. <https://doi.org/10.1002/bse.2801>
- Compite 360. (2023). *¿Qué es Compite 360?* <http://www.compite360.com/queEs>
- Cong, J., Zheng, P., Bian, Y., Chen, C.-H., Li, J., & Li, X. (2022). A machine learning-based iterative design approach to automate user satisfaction degree prediction in smart product-service system. *Computers & Industrial Engineering*, 165, 107939. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107939>
- Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1). <https://doi.org/10.1108/09574099710805556>
- Cristina De Stefano, M., Montes-Sancho, M. J., & Busch, T. (2016). A natural resource-based view of climate change: Innovation challenges in the automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.023>
- Dahmani, N., Benhida, K., Belhadi, A., Kamble, S., Elfezazi, S., & Jauhar, S. K. (2021). Smart circular product design strategies towards eco-effective production systems: A lean eco-design industry 4.0 framework. *Journal of Cleaner Production*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128847>
- DANE. (2022, August 12). *PIB por departamento*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

-
- DANE. (2023). *Encuesta Mensual Manufacturera con Enfoque Territorial – EMMET Diciembre 2022*.
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/emmet/bol_emmet_diciembre_2022.pdf
- Darwish, L. R., El-Wakad, M. T., & Farag, M. M. (2021). Towards sustainable industry 4.0: A green real-time IIoT multitask scheduling architecture for distributed 3D printing services. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.004>
- De Giovanni, P., & Cariola, A. (2021a). Process innovation through industry 4.0 technologies, lean practices and green supply chains. *Research in Transportation Economics*, 90, 100869.
<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100869>
- De Giovanni, P., & Cariola, A. (2021b). Process innovation through industry 4.0 technologies, lean practices and green supply chains. *Research in Transportation Economics*, 90, 100869.
- DePamphilis, D. M. (2019). Introduction. In *Mergers, Acquisitions, and Other Restructuring Activities* (p. 175). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815075-7.09983-6>
- Despeisse, M., Chari, A., González Chávez, C. A., Monteiro, H., Machado, C. G., & Johansson, B. (2022). A systematic review of empirical studies on green manufacturing: eight propositions and a research framework for digitalized sustainable manufacturing. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), 727–759. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2127428>

-
- Dhingra, R., Kress, R., & Upreti, G. (2014). Does lean mean green? *Journal of Cleaner Production*, 85, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.032>
- Díaz-Reza, J. R., Mousavi, S. H., Sánchez-Ramírez, C., & García-Alcaraz, J. L. (2024). Achieving social sustainability through lean manufacturing practices: Insights from structural equation model and system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 448, 141453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141453>
- Ding, B., Ferràs Hernández, X., & Agell Jané, N. (2021). Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production Planning & Control*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1934587>
- Ding, B., Ferràs Hernández, X., & Agell Jané, N. (2023). Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production Planning & Control*, 34(5), 442–458. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1934587>
- Dixit, A., Jakhar, S. K., & Kumar, P. (2022). Does lean and sustainable manufacturing lead to Industry 4.0 adoption: The mediating role of ambidextrous innovation capabilities. *Technological Forecasting and Social Change*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121328>
- Dominique, P., & Crégo, P. (2018). *Wearables, Smart Textiles & Smart Apparel*. Elsevier.

-
- Duarte, S., & Cruz-Machado, V. (2017). Exploring linkages between lean and green supply chain and the industry 4.0. *International Conference on Management Science and Engineering Management*, 1242–1252.
- Ebrahim, M. T., & Alothman, A. A. (2022). The reliability and validity of the multidimensional scale of perceived social support (MSPSS) in mothers of children with developmental disabilities in Saudi Arabia. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 92, 101926. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2022.101926>
- Elbeltagi, A., Kushwaha, N. L., Srivastava, A., & Zoof, A. T. (2022). Artificial intelligent-based water and soil management. In *Deep Learning for Sustainable Agriculture* (pp. 129–142). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85214-2.00008-2>
- Elkington, J., & Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
- Escobedo Portillo, M. T., Hernández Gómez, J. A., Estebané Ortega, V., & Martínez Moreno, G. (2016). Modelos de ecuaciones estructurales: Características, fases, construcción, aplicación y resultados. *Ciencia & Trabajo*, 18(55), 16–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-24492016000100004>
- Fallahpour, A., Yazdani, M., Mohammed, A., & Wong, K. Y. (2021). Green sourcing in the era of industry 4.0: towards green and digitalized competitive advantages. *Industrial Management & Data Systems*, 121(9), 1997–2025. <https://doi.org/10.1108/IMDS-06-2020-0343>
- Farias, L. M. S., Santos, L. C., Gohr, C. F., Oliveira, L. C. de, & Amorim, M. H. da S. (2019). Criteria and practices for lean and green performance assessment:

- Systematic review and conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 218, 746–762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.042>
- Fathy, M., Kazemzadeh Haghghi, F., & Ahmadi, M. (2024). Uncertainty quantification of reservoir performance using machine learning algorithms and structured expert judgment. *Energy*, 288, 129906. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129906>
- Ferreyro, A., & Longhi, A. L. De. (2014). *Metodología de la investigación* (Issue 1). Encuentro Grupo Editor.
- Fiorello, M., Gladysz, B., Corti, D., Wybraniak-Kujawa, M., Ejsmont, K., & Sorlini, M. (2023a). Towards a smart lean green production paradigm to improve operational performance. *Journal of Cleaner Production*, 413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137418>
- Fiorello, M., Gladysz, B., Corti, D., Wybraniak-Kujawa, M., Ejsmont, K., & Sorlini, M. (2023b). Towards a smart lean green production paradigm to improve operational performance. *Journal of Cleaner Production*, 413, 137418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137418>
- Florescu, A., & Barabas, S. (2022). Development Trends of Production Systems through the Integration of Lean Management and Industry 4.0. *APPLIED SCIENCES-BASEL*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/app12104885>
- Florida, R. (1996). Lean and green: the move to environmentally conscious manufacturing. *California Management Review*, 39(1), 80–105.
- Fontoura, L., Nascimento, D. L. de M., Neto, J. V., Garcia-Buendia, N., Garza-Reyes, J. A., Lima, G. B. A., Tortorella, G. L., Caiado, R. G. G., & Meiriño, M.

-
- J. (2023). Real-time energy flow mapping: A VSM-based proposal for energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 419, 137871.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137871>
- Fornell, C. (1985). *A second generation of multivariate analysis: Classification of methods and implications for marketing research*.
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981a). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39–50.
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981b). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39–50.
- Forrester, P. L., Kazumi Shimizu, U., Soriano-Meier, H., Arturo Garza-Reyes, J., & Fernando Cruz Basso, L. (2010). Lean production, market share and value creation in the agricultural machinery sector in Brazil. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(7), 853–871.
<https://doi.org/10.1108/17410381011077955>
- Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. *Sensors*, 21(17), 5745. <https://doi.org/10.3390/s21175745>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>

-
- Frankenfield, J. (2022, May 22). *Investopedia*. Investopedia.
<https://www.investopedia.com/terms/b/business-intelligence-bi.asp>
- Fruggiero, F., Lambiase, A., Panagou, S., & Sabattini, L. (2020). Cognitive Human Modeling in Collaborative Robotics. *Procedia Manufacturing*, 51, 584–591.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.082>
- Garcia-Sabater, J. J., & Marin-Garcia, J. A. (2011). Can we still talk about continuous improvement? Rethinking enablers and inhibitors for successful implementation. *International Journal of Technology Management*, 55(1/2), 28–42.
- Garg, R. K. (2021). Structural equation modeling of E-supplier selection criteria in mechanical manufacturing industries. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127597. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127597>
- Garza-Reyes, J. A. (2015). Lean and green – a systematic review of the state of the art literature. *Journal of Cleaner Production*, 102.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.064>
- Gaskin, J., James, M., & Lim, J. (2019). *Master validity tool. AMOS plugin in: Gaskination's StatWiki, 2019*. Gaskination's StatWiki.
- Gaskin, J., & Lim, J. (2016). *Master validity tool. AMOS Plugin In: Gaskination's StatWiki*.
- Gaskin, J., & Lim, J. (2017). *Model fit measures, amos plugin, 2016. Gaskination's StatWiki*.
- Gaskin, J., & Lim, J. (2018a). *Indirect effects. AMOS Plugin. Gaskination's StatWiki*.

-
- Gaskin, J., & Lim, J. (2018b). Merge SRW tables. *AMOS Plugin.. Gaskination's StatWiki*.
- Ghadge, A., Mogale, D. G., Bourlakis, M., M. Maiyar, L., & Moradlou, H. (2022). Link between Industry 4.0 and green supply chain management: Evidence from the automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108303. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108303>
- Ghaithan, A., Khan, M., Mohammed, A., & Hadidi, L. (2021). Impact of Industry 4.0 and Lean Manufacturing on the Sustainability Performance of Plastic and Petrochemical Organizations in Saudi Arabia. *Sustainability*, 13(20), 11252. <https://doi.org/10.3390/su132011252>
- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2019). Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(1), 1–30. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2018-0417>
- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2020). Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing. *JOURNAL OF MANUFACTURING TECHNOLOGY MANAGEMENT*, 31(1), 1–30. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2018-0417>
- Gladysz, B., Krystosiak, K., Ejsmont, K., Kluczek, A., & Buczacki, A. (2021). Sustainable Printing 4.0—Insights from a Polish Survey. *Sustainability*, 13(19), 10916.
- Greco, S. F., Podofillini, L., & Dang, V. N. (2023). A Bayesian two-stage approach to integrate simulator data and expert judgment in human error probability

- estimation. *Safety Science*, 159, 106009.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106009>
- Groten, M., & Gallego-Garcia, S. (2021). A Systematic Improvement Model to Optimize Production Systems within Industry 4.0 Environments: A Simulation Case Study. *APPLIED SCIENCES-BASEL*, 11(23).
<https://doi.org/10.3390/app112311112>
- Gupta, S., Dangayach, G. S., Singh, A. K., Meena, M. L., & Rao, P. N. (2018). Implementation of sustainable manufacturing practices in Indian manufacturing companies. *Benchmarking: An International Journal*, 25(7), 2441–2459. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2016-0186>
- Hadi, S., & Baskaran, S. (2021). Examining sustainable business performance determinants in Malaysia upstream petroleum industry. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126231>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis: Global edition*. NJ: Pearson Higher Education Upper Saddle River.
- Hajian, M., & Kashani, S. J. (2021). Evolution of the concept of sustainability. From Brundtland Report to sustainable development goals. In *Sustainable Resource Management* (pp. 1–24). Elsevier.
- Harris, J. E., & Gleason, P. M. (2022). Application of Path Analysis and Structural Equation Modeling in Nutrition and Dietetics. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 122(11), 2023–2035.
<https://doi.org/10.1016/j.jand.2022.07.007>

-
- Hart, S. L. (1995). A Natural-Resource-Based View of the Firm. *The Academy of Management Review*, 20(4). <https://doi.org/10.2307/258963>
- Hasson, F., Keeney, S., & McKenna, H. (2000). Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of Advanced Nursing*, 32(4), 1008–1015.
- Henao, R., Sarache, W., & Gómez, I. (2019). Lean manufacturing and sustainable performance: Trends and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 208, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.116>
- Hepburn, B., & Andersen, H. (2023). *Scientific method*. <https://plato.stanford.edu/entries/scientific-method/>
- Hernández, J. B., Hernández, J. L. T., & Pulgarín, S. M. P. (2017). Implementación del método Justo a Tiempo (JIT). *Revista CIES Escolme*, 5(02), 9–28.
- Herron, C., & Hicks, C. (2008). The transfer of selected lean manufacturing techniques from Japanese automotive manufacturing into general manufacturing (UK) through change agents. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4), 524–531.
- Hines, P. (2009). *Lean and Green, Source Magazine the Home of Lean Thinking*.
- Hines, P., Holweg, M., & Rich, N. (2004). Learning to evolve: a review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Hopland, A. O., & Kvamsdal, S. F. (2023). Drinking water contamination and treatment costs. *Water Resources and Economics*, 43, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2023.100225>

-
- Hu, L., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 6(1), 1–55.
<https://doi.org/10.1080/10705519909540118>
- Huan, Y., Liang, T., Li, H., & Zhang, C. (2021). A systematic method for assessing progress of achieving sustainable development goals: A case study of 15 countries. *Science of The Total Environment*, 752, 141875.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141875>
- Huang, J.-F., Chen, C.-T. A., Chen, M.-H., Huang, S.-L., & Hsu, P.-Y. (2023). Structural Equation Modeling of the Marine Ecological System in Nanwan Bay Using SPSS Amos. *Sustainability*, 15(14), 11435.
<https://doi.org/10.3390/su151411435>
- Huo, B., Gu, M., & Wang, Z. (2019). Green or lean? A supply chain approach to sustainable performance. *Journal of Cleaner Production*, 216.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.141>
- Hussey, D. M., & Eagan, P. D. (2007). Using structural equation modeling to test environmental performance in small and medium-sized manufacturers: can SEM help SMEs? *Journal of Cleaner Production*, 15(4), 303–312.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.12.002>
- Inman, R. A., & Green, K. W. (2018). Lean and green combine to impact environmental and operational performance. *International Journal of Production Research*, 56(14), 4802–4818.

INVEST IN SANTANDER. (2023). *Datos del Departamento de Santander*.

<https://www.investinsantander.co/razones-para-invertir-/datos-generales-del-departamento-de-santander/>

Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Freitas, W. R. de S., & Teixeira, A. A.

(2013). Lean and green?: evidências empíricas do setor automotivo brasileiro. *Gestão & Produção*, 20(3), 653–665.

<https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013000300011>

Javaid, M., Haleem, A., Pratap Singh, R., Khan, S., & Suman, R. (2021).

Blockchain technology applications for Industry 4.0: A literature-based review. *Blockchain: Research and Applications*, 2(4), 100027.

<https://doi.org/10.1016/j.bcra.2021.100027>

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Sinha, A. K. (2024). Digital economy to

improve the culture of industry 4.0: A study on features, implementation and challenges. *Green Technologies and Sustainability*, 2(2), 100083.

<https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100083>

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), e07753.

John, L., Sampayo, M., & Pecas, P. (2021). Lean & Green on Industry 4.0 Context

- Contribution to Understand L&G Drivers and Design Principles.

INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICAL ENGINEERING AND

MANAGEMENT, 6(5), 1214–1229.

<https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2021.6.5.073>

John, L., Sampayo, M., & Peças, P. (2021). Lean & Green on Industry 4.0 Context—Contribution to Understand L&G Drivers and Design Principles. *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci*, 6, 1214–1229.

Joshi, S., Sharma, M., Bartwal, S., Joshi, T., & Prasad, M. (2022). Critical challenges of integrating OPEX strategies with I4.0 technologies in manufacturing SMEs: a few pieces of evidence from developing economies. *The TQM Journal*. <https://doi.org/10.1108/TQM-08-2022-0245>

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1319–1337. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772>

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>

Kante, M., & Michel, B. (2023). Use of partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM) in privacy and disclosure research on social network sites: A systematic review. *Computers in Human Behavior Reports*, 10, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100291>

Karmaker, C. L., Aziz, R. Al, Ahmed, T., Misbauddin, S. M., & Moktadir, Md. A. (2023). Impact of industry 4.0 technologies on sustainable supply chain

- performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138249>
- Khan, M. T., Idrees, M. D., & Haider, Y. (2023). Industry 4.0 impacts on operational and green innovation performances with the mediation of green practices. *International Journal of Productivity and Performance Management*. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2022-0277>
- Khan, S. A. R., Sheikh, A. A., & Ahmad, Z. (2023). Developing the interconnection between green employee behavior, tax avoidance, green capability, and sustainable performance of SMEs through corporate social responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138236>
- Khanchezarrin, S., Ghaebi Panah, M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Seraji, H. (2023). Considering Socioeconomic and Environmental Pillars of Sustainability Approach and Sustainable Development Goals to Design a Model for COVID-19 Vaccination. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139669. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139669>
- Kiran, D. R. (2022). Creativity and Kaizen. In *Principles of Economics and Management for Manufacturing Engineering* (pp. 193–204). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99862-8.00028-5>
- Kolberg, D., & Zühlke, D. (2015). Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870–1875.

-
- Krabbe, P. F. M. (2017). Validity. In *The Measurement of Health and Health Status* (pp. 113–134). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801504-9.00007-6>
- Kraines, M. A., Uebelacker, L. A., Gaudiano, B. A., Jones, R. N., Beard, C., Loucks, E. B., & Brewer, J. A. (2020). An adapted Delphi approach: The use of an expert panel to operationally define non-judgment of internal experiences as it relates to mindfulness. *Complementary Therapies in Medicine*, 51, 102444. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102444>
- Kumar, M., & Rodrigues, V. S. (2020). Synergetic effect of lean and green on innovation: A resource-based perspective. *International Journal of Production Economics*, 219, 469–479.
- Kumar, N., Singh, A., Gupta, S., Kaswan, M. S., & Singh, M. (2024). Integration of Lean manufacturing and Industry 4.0: a bibliometric analysis. *The TQM Journal*, 36(1), 244–264. <https://doi.org/10.1108/TQM-07-2022-0243>
- Kumar, R., Rehman, U. U., & Phanden, R. K. (2022). Strengthening the social performance of Indian SMEs in the digital era: a fuzzy DEMATEL analysis of enablers. *TQM Journal*. <https://doi.org/10.1108/TQM-06-2022-0193>
- Kumar Reddy, N. G. K., & Rajeshwari, K. (2016, October). Interactive clothes based on Internet of Things using NFC and mobile application. 2016 *Management and Innovation Technology International Conference (MITicon)*. <https://doi.org/10.1109/MITICON.2016.8025237>
- Kumar, S. A., & Prasad, R. V. S. (2021). Basic principles of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies. In *Additive*

-
- Manufacturing* (pp. 17–35). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822056-6.00012-6>
- Kunkera, Z., Tosanovic, N., & Stefanic, N. (2022). Improving the Shipbuilding Sales Process by Selected Lean Management Tool. *MACHINES*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/machines10090766>
- Lavidas, K., Papadakis, S., Filippidi, A., Karachristos, C., Misirli, A., Tzavara, A., Komis, V., & Karacapilidis, N. (2023). Predicting the Behavioral Intention of Greek University Faculty Members to Use Moodle. *Sustainability*, 15(7), 6290. <https://doi.org/10.3390/su15076290>
- Lean production. (2022). *TPM (MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL)*. <https://www.leanproduction.com/tpm/>
- Leong, W. D., Lam, H. L., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Tan, C. P., & Ponnambalam, S. G. (2019). Lean and green manufacturing—a review on its applications and impacts. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3(1), 5–23.
- Leong, W. D., Teng, S. Y., How, B. S., Ngan, S. L., Abd Rahman, A., Tan, C. P., Ponnambalam, S. G., & Lam, H. L. (2020). Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122870.
- Leong, W. D., Teng, S. Y., How, B. S., Ngan, S. L., Rahman, A. A., Tan, C. P., Ponnambalam, S. G., & Lam, H. L. (2020). Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122870>

-
- Lerman, L. V., Benitez, G. B., Gerstlberger, W., Rodrigues, V. P., & Frank, A. G. (2021). Sustainable conditions for the development of renewable energy systems: A triple bottom line perspective. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103362. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103362>
- Lin, C.-H., Wang, K.-J., Tadesse, A. A., & Woldegiorgis, B. H. (2022). Human-robot collaboration empowered by hidden semi-Markov model for operator behaviour prediction in a smart assembly system. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 317–333. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.001>
- Liu, W., Long, S., & Wei, S. (2022). Correlation mechanism between smart technology and smart supply chain innovation performance: A multi-case study from China's companies with Physical Internet. *International Journal of Production Economics*, 245, 108394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108394>
- Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2022). New perspectives and results for Smart Operators in industry 4.0: A human-centered approach. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107824. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107824>
- Lu, J., Ren, L., Zhang, C., Rong, D., Ahmed, R. R., & Streimikis, J. (2020a). Modified Carroll's pyramid of corporate social responsibility to enhance organizational performance of SMEs industry. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122456>
- Lu, J., Ren, L., Zhang, C., Rong, D., Ahmed, R. R., & Streimikis, J. (2020b). Modified Carroll's pyramid of corporate social responsibility to enhance

- organizational performance of SMEs industry. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122456>
- Lugert, A., Batz, A., & Winkler, H. (2018). Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(5), 886–906. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2017-0236>
- Luthra, S., Kumar, A., Zavadskas, E. K., Mangla, S. K., & Garza-Reyes, J. A. (2020). Industry 4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: an analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1505–1521. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1660828>
- Luthra, S., & Mangla, S. K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018>
- Ma, X., Feng, X., Fu, D., Tong, J., & Ji, M. (2024). How does the digital economy impact sustainable development? —An empirical study from China. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140079. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140079>
- Maass, W., Parsons, J., Purao, S., Storey, V. C., & Woo, C. (2018). Data-Driven Meets Theory-Driven Research in the Era of Big Data: Opportunities and Challenges for Information Systems Research. *Journal of the Association for Information Systems*, 1253–1273. <https://doi.org/10.17705/1jais.00526>

-
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462–1484.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>
- Machchhar, R. J., Toller, C. N. K., Bertoni, A., & Bertoni, M. (2022). Data-driven value creation in Smart Product-Service System design: State-of-the-art and research directions. *Computers in Industry*, 137, 103606.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103606>
- MacKinnon, D. P., Coxé, S., & Baraldi, A. N. (2012). Guidelines for the Investigation of Mediating Variables in Business Research. *Journal of Business and Psychology*, 27(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10869-011-9248-z>
- Majszak, M., & Jebeile, J. (2023). Expert judgment in climate science: How it is used and how it can be justified. *Studies in History and Philosophy of Science*, 100, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2023.05.005>
- Malhotra, N. K., & Dash, S. (2011). *Marketing research an applied orientation (paperback)*. London: Pearson Publishing.
- Manzano Ramírez, M., & Gisbert Soler, V. (2016). Lean Manufacturing: implantación 5S. *3C Tecnología_Glosas de Innovación Aplicadas a La Pyme*, 5(4), 16–26. <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2016.v5n4e20.16-26>
- Martinho, R., Lopes, J., Jorge, D., de Oliveira, L. C., Henriques, C., & Peças, P. (2022). IoT Based Automatic Diagnosis for Continuous Improvement. *Sustainability*, 14(15), 9687. <https://doi.org/10.3390/su14159687>

-
- Mavrou, I. (2015). Análisis factorial exploratorio: cuestiones conceptuales y metodológicas. *Revista Nebrija de Lingüística Aplicada a La Enseñanza de Lenguas*, 19, 71–80.
- Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth. A Report For the Club Of Rome's Project On the Predicament Of Mankind Earth Island Limited*.
- Meng, K., Zhong, K., Abbas, S., Sofuoğlu, E., Kaosarat Olawunmi, I., & Sinha, A. (2023). To import or not to import: A global comparative study of energy and natural resource policies for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138490. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138490>
- Mia, M. M., Zayed, N. M., Islam, K. M. A., Nitsenko, V., Matusевич, T., & Mordous, I. (2022). The Strategy of Factors Influencing Learning Satisfaction Explored by First and Second-Order Structural Equation Modeling (SEM). *Inventions*, 7(3), 59. <https://doi.org/10.3390/inventions7030059>
- Michán, L., & Muñoz-Velasco, I. (2013). Scientometrics for the medical sciences: Definitions, applications and perspectives. *Investigación En Educación Médica*, 2(6), 100–106.
- MINISTERIO DE COMERCIO, I. Y. T. (2020). *Sociedades BIC, Empresas con propósito*. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/25581/E-Book.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Grau, P., & Viles, E. (2021). Toolkit for simultaneously improving production and environmental efficiencies. *Central European Journal of Operations Research*, 29(4), 1219–1230.

-
- Narula, S., Puppala, H., Kumar, A., Frederico, G. F., Dwivedy, M., Prakash, S., & Talwar, V. (2021). Applicability of industry 4.0 technologies in the adoption of global reporting initiative standards for achieving sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127141.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127141>
- Nascimento, D. L. de M., Quelhas, O. L. G., Moyano-Fuentes, J., Tortorella, G. L., & Maqueira, J. M. (2022). Circular value stream mapping 4.0: Proposed general model and application to a digital 3D printing recycling factory. *Sustainable Production and Consumption*, 34, 600–612.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.012>
- Nations, U. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development United Nations*.
- Naufal, A., Jaffar, A., Yusoff, N., & Hayati, N. (2012). Development of Kanban System at Local Manufacturing Company in Malaysia–Case Study. *Procedia Engineering*, 41, 1721–1726. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.374>
- Naveed, Q. N., Alam, M. M., & Tairan, N. (2020). Structural Equation Modeling for Mobile Learning Acceptance by University Students: An Empirical Study. *Sustainability*, 12(20), 8618. <https://doi.org/10.3390/su12208618>
- Ng, R., Low, J. S. C., & Song, B. (2015). Integrating and implementing Lean and Green practices based on proposition of Carbon-Value Efficiency metric. *Journal of Cleaner Production*, 95, 242–255.

-
- Nguyen, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo, S., & Lekens, B. (2021). Data analytics in pharmaceutical supply chains: state of the art, opportunities, and challenges. *International Journal of Production Research*, 1–20.
- Ni, L., Ahmad, S. F., Alshammari, T. O., Liang, H., Alsanie, G., Irshad, M., Alyafi-AlZahri, R., BinSaeed, R. H., Al-Abyadh, M. H. A., Abu Bakir, S. M. M., & Ayassrah, A. Y. A. B. A. (2023). The role of environmental regulation and green human capital towards sustainable development: The mediating role of green innovation and industry upgradation. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138497. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138497>
- Nichol, B., Kemp, E., Wilson, R., Rodrigues, A. M., Hesselgreaves, H., Robson, C., & Houghton, C. (2024). Establishing an updated consensus on the conceptual and operational definitions of Making Every Contact Count (MECC) across experts within research and practice: an international Delphi Study. *Public Health*, 230, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2024.01.023>
- Ojha, R. (2022). Lean in industry 4.0 is accelerating manufacturing excellence—A DEMATEL analysis. *The TQM Journal*.
- Oliveira, G. A., Tan, K. H., & Guedes, B. T. (2018). Lean and green approach: An evaluation tool for new product development focused on small and medium enterprises. *International Journal of Production Economics*, 205, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.026>
- Ooi, L. L., Teh, S. Y., & Cheang, P. Y. S. (2023). The impact of lean production on sustainable organizational performance: the moderating effect of industry 4.0

- technologies adoption. *Management Research Review*, 46(12), 1802–1836.
<https://doi.org/10.1108/MRR-06-2022-0448>
- Organización mundial de la salud (OMS). (2023, September 23). *Agua para consumo humano*. OMS. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Osborne, J. W., Costello, A. B., & Kellow, J. T. (2008). Exploratory factor analysis (EFA) is rightly described as both an art and a science, where researchers follow a series of analytic steps involving judgments more reminiscent of qualitative inquiry, an interesting irony given the mathematical sophistication underlying EFA models'. *Best Practices in Quantitative Methods*, 86.
- Pampanelli, A. B. (2015). A Lean & Green Model for a Value Stream. *Proceeding of 5th International Workshop| Advances in Cleaner Production*, 1.
- Pampanelli, A. B., Found, P., & Bernardes, A. M. (2014). A Lean & Green Model for a production cell. *Journal of Cleaner Production*, 85, 19–30.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.014>
- Park, K. T., Kang, Y. T., Yang, S. G., Zhao, W. Bin, Kang, Y.-S., Im, S. J., Kim, D. H., & Choi Su Young and Do Noh, S. (2020). Cyber Physical Energy System for Saving Energy of the Dyeing Process with Industrial Internet of Things and Manufacturing Big Data. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN*, 7(1), 219–238.
<https://doi.org/10.1007/s40684-019-00084-7>
- Paula Pinheiro, M. A., Jugend, D., de Sousa Jabbour, A. B. L., Chiappetta Jabbour, C. J., & Latan, H. (2022). Circular economy-based new products

- and company performance: The role of stakeholders and Industry 4.0 technologies. *BUSINESS STRATEGY AND THE ENVIRONMENT*, 31(1), 483–499. <https://doi.org/10.1002/bse.2905>
- PAULRAJ, A. (2011). UNDERSTANDING THE RELATIONSHIPS BETWEEN INTERNAL RESOURCES AND CAPABILITIES, SUSTAINABLE SUPPLY MANAGEMENT AND ORGANIZATIONAL SUSTAINABILITY*. *Journal of Supply Chain Management*, 47(1). <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2010.03212.x>
- Pei, Z., Yu, T., Yi, W., & Li, Y. (2021). Twenty-year retrospection on green manufacturing: A bibliometric perspective. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 3(4), 303–323. <https://doi.org/10.1049/cim2.12038>
- Pereira, C., & Sachidananda, H. K. (2022). Impact of industry 4.0 technologies on lean manufacturing and organizational performance in an organization. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(1), 25–36. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00797-7>
- Perez, J. A. E., Ejaz, F., & Ejaz, S. (2023). Green Transformational Leadership, GHRM, and Proenvironmental Behavior: An Effectual Drive to Environmental Performances of Small- and Medium-Sized Enterprises. *Sustainability*, 15(5), 4537. <https://doi.org/10.3390/su15054537>
- Pervan, M., Curak, M., & Pavic Kramaric, T. (2017). The Influence of Industry Characteristics and Dynamic Capabilities on Firms' Profitability. *International Journal of Financial Studies*, 6(1), 4. <https://doi.org/10.3390/ijfs6010004>

-
- Phuyal, S., Bista, D., & Bista, R. (2020). Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review. *Sustainable Futures*, 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100023>
- PNUD. (2021, October 27). *Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- Probst, A., Nitzl, C., Kraus, F., & Förstner, R. (2020). Cost estimation of an asteroid mining mission using partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM). *Acta Astronautica*, 167, 440–454. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.07.032>
- Psarommatis, F., Fraile, F., & Ameri, F. (2023). Zero Defect Manufacturing ontology: A preliminary version based on standardized terms. *Computers in Industry*, 145, 103832. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103832>
- Qi, Y., Li, L., & Kong, F. (2023). Research on the Improvement Path of Prefabricated Buildings' Supply Chain Resilience Based on Structural Equation Modeling: A Case Study of Shenyang and Hangzhou, China. *Buildings*, 13(11), 2801. <https://doi.org/10.3390/buildings13112801>
- Qu, Y., Ming, X., Ni, Y., Li, X., Liu, Z., Zhang, X., & Xie, L. (2019). An integrated framework of enterprise information systems in smart manufacturing system via business process reengineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(11), 2210–2224. <https://doi.org/10.1177/0954405418816846>

-
- Rahardjo, B., Wang, F.-K., Yeh, R.-H., & Chen, Y.-P. (2023a). Lean Manufacturing in Industry 4.0: A Smart and Sustainable Manufacturing System. *Machines*, 11(1), 72. <https://doi.org/10.3390/machines11010072>
- Rahardjo, B., Wang, F.-K., Yeh, R.-H., & Chen, Y.-P. (2023b). Lean Manufacturing in Industry 4.0: A Smart and Sustainable Manufacturing System. *Machines*, 11(1), 72. <https://doi.org/10.3390/machines11010072>
- Rakib, Md. R. H. K., Pramanik, S. A. K., Amran, Md. Al, Islam, Md. N., & Sarker, Md. O. F. (2022). Factors affecting young customers' smartphone purchase intention during Covid-19 pandemic. *Heliyon*, 8(9), e10599. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10599>
- Ramirez-Peña, M., Sánchez Sotano, A. J., Pérez-Fernandez, V., Abad, F. J., & Batista, M. (2020). Achieving a sustainable shipbuilding supply chain under I4.0 perspective. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118789. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118789>
- Raut, R. D., Mangla, S. K., Narwane, V. S., Gardas, B. B., Priyadarshinee, P., & Narkhede, B. E. (2019a). Linking big data analytics and operational sustainability practices for sustainable business management. *Journal of Cleaner Production*, 224, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.181>
- Raut, R. D., Mangla, S. K., Narwane, V. S., Gardas, B. B., Priyadarshinee, P., & Narkhede, B. E. (2019b). Linking big data analytics and operational sustainability practices for sustainable business management. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 224, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.181>

-
- Rehman Khan, S. A., Yu, Z., Sarwat, S., Godil, D. I., Amin, S., & Shujaat, S. (2021). The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1–18.
<https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512>
- Rehman Khan, S. A., Yu, Z., Sarwat, S., Godil, D. I., Amin, S., & Shujaat, S. (2022). The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance. *INTERNATIONAL JOURNAL OF LOGISTICS-RESEARCH AND APPLICATIONS*, 25(4–5, SI), 605–622.
<https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512>
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. G. (2002). Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17(3), 185–206.
- Reis, L. V., Kipper, L. M., Giraldo Velásquez, F. D., Hofmann, N., Frozza, R., Ocampo, S. A., & Taborda Hernandez, C. A. (2018). A model for Lean and Green integration and monitoring for the coffee sector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 62–73.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.034>
- Reyes, J., Mula, J., & Díaz-Madroño, M. (2021). Development of a conceptual model for lean supply chain planning in industry 4.0: multidimensional analysis for operations management. *Production Planning and Control*.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1993373>

-
- Richnák, P., & Fidlerová, H. (2022). Impact and Potential of Sustainable Development Goals in Dimension of the Technological Revolution Industry 4.0 within the Analysis of Industrial Enterprises. *Energies*, 15(10), 3697. <https://doi.org/10.3390/en15103697>
- Rodrigues, H. S., Alves, W., & Silva, Â. (2020). The impact of lean and green practices on logistics performance: a structural equation modelling. *Production*, 30.
- Rodríguez-González, R. M., Madrid-Guijarro, A., & Maldonado-Guzmán, G. (2023). Digital organizational culture and absorptive capacity as precursors to supply chain resilience and sustainable performance. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138411>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020a). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644–1661. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1672902>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020b). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644–1661. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1672902>
- Rowe, G., & Wright, G. (2001). Expert opinions in forecasting: the role of the Delphi technique. *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*, 125–144.

Rumsey, S. (2008). *EBOOK: How to Find Information: A Guide for Researchers*. McGraw-Hill Education (UK).

Sadiq, M. A., Rajeswari, B., Ansari, L., & Danish Kirmani, M. (2021). The role of food eating values and exploratory behaviour traits in predicting intention to consume organic foods: An extended planned behaviour approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 59, 102352.

<https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2020.102352>

Sadiq, S., Amjad, M. S., Rafique, M. Z., Hussain, S., Yasmeen, U., & Khan, M. A. (2021). An integrated framework for lean manufacturing in relation with blue ocean manufacturing - A case study. *Journal of Cleaner Production*, 279.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123790>

Salem, I., Saleh, Y., Alsayed, M. F., Assaf, R., Kanan, M., Musleh Al-Sartawi, A. M. A., & BinSaddig, R. (2023). Adoption of renewable energy sources and sustainable performance in palestinian industrial and commercial sectors with governmental role as a moderator: An explanatory approach. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(3), 100139.

<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100139>

Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill México.

Sant' Ana, J. F., da Silva Filho, A. B., & Pereira, N. N. (2023). Identification of sustainable practices applied to ship recycling. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136050. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136050>

-
- Santos, J., Muñoz-Villamizar, A., Ormazábal, M., & Viles, E. (2019). Using problem-oriented monitoring to simultaneously improve productivity and environmental performance in manufacturing companies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(2), 183–193.
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1552796>
- Scrima, F. (2015). The convergent-discriminant validity of the Workplace Attachment Scale (WAS). *Journal of Environmental Psychology*, 43, 24–29.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.05.009>
- Selznick, P. (1957). *Leadership in administration* Harper & Row New York USA.
- Sennewald, C. A. (2011). Computers and Effective Security Management. In *Effective Security Management* (pp. 205–217). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382012-9.00021-6>
- Shafiullah, M., Abido, M. A., & Al-Mohammed, A. H. (2022). Artificial intelligence techniques. In *Power System Fault Diagnosis* (pp. 69–100). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88429-7.00007-2>
- Shahin, M., Chen, F. F., Hosseinzadeh, A., Bouzary, H., & Shahin, A. (2024). Waste reduction via image classification algorithms: beyond the human eye with an AI-based vision. *International Journal of Production Research*, 62(9), 3193–3211. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2225652>
- Sharma, S., Gupta, N., & Thakur, P. (2024). The lean link: exploring industry 4.0's influence on sustainable operational performance for services. *International Journal of Quality & Reliability Management*. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-12-2023-0372>

-
- Siddik, A. B., Rahman, M. N., & Yong, L. (2023). Do fintech adoption and financial literacy improve corporate sustainability performance? The mediating role of access to finance. *Journal of Cleaner Production*, 421, 137658.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137658>
- Silva, S. (2012). Applicability of value stream mapping (VSM) in the apparel industry in Sri Lanka. *International Journal of Lean Thinking*, 3(1), 36–41.
- Singh, C., Singh, D., & Khamba, J. S. (2021). Understanding the key performance parameters of green lean performance in manufacturing industries. *Materials Today: Proceedings*, 46, 111–115.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.328>
- Sinha, N., & Matharu, M. (2019). A comprehensive insight into lean management: Literature review and trends. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(2), 302–317. <https://doi.org/10.3926/jiem.2885>
- Slim, R., Houssin, R., Coulibaly, A., & Chibane, H. (2021). Lean System Design Framework Based on Lean Functionalities and Criteria Integration in Production Machines Design Phase [ОКВИР ЗА ДИЗАЈНИРАЊЕ ОПТИМИЗОВАНОГ СИСТЕМА ПРОИЗВОДЊЕ БАЗИРАНОГ НА ОПТИМИЗОВАНОЈ ФУНКЦИОНАЛНОСТИ И ИНТЕГРАЦИЈИ КРИТЕРИЈУМА У ФАЗИ ДИЗАЈНИРАЊА ПРОИЗВОДНИХ МАШИНА]. *FME Transactions*, 49(3), 575–586. <https://doi.org/10.5937/fme2103575S>
- Sony, M., & Naik, S. (2020). Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model. *Technology in Society*, 61, 101248. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101248>

-
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in Industry 4.0: A review. *Data Science and Management*, 7(1), 47–63.
<https://doi.org/10.1016/j.dsm.2023.10.006>
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 254–267.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536–541.
- Streiner, D. L. (1994). Figuring Out Factors: The Use and Misuse of Factor Analysis. *The Canadian Journal of Psychiatry*, 39(3), 135–140.
<https://doi.org/10.1177/070674379403900303>
- Subramanian, N., Gunasekaran, A., Yu, J., Cheng, J., & Ning, K. (2014). Customer satisfaction and competitiveness in the Chinese E-retailing: Structural equation modeling (SEM) approach to identify the role of quality factors. *Expert Systems with Applications*, 41(1), 69–80.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.012>
- Sun, Y., Zhu, L., Li, J., Zhang, N., Tang, Y., Wang, X., & Wu, H. (2023). Study on the Influence and Optimization of Neighborhood Space on the Perceived Restoration of Rural Left-Behind Older People: The Case of Changsha, China. *Sustainability*, 15(18), 13326. <https://doi.org/10.3390/su151813326>
- Syed, A. A., Gupta, S., & Rai, D. (2021). Psychological, social and economic impact of COVID 19 on the working population of India: Exploratory factor

- analysis approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 102617. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102617>
- Syed, R., Suriadi, S., Adams, M., Bandara, W., Leemans, S. J. J., Ouyang, C., ter Hofstede, A. H. M., van de Weerd, I., Wynn, M. T., & Reijers, H. A. (2020). Robotic Process Automation: Contemporary themes and challenges. *Computers in Industry*, 115, 103162. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103162>
- Taddeo, R., Simboli, A., Di Vincenzo, F., & Ioppolo, G. (2019). A bibliometric and network analysis of Lean and Clean(er) production research (1990/2017). *Science of The Total Environment*, 653, 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.412>
- Tantscher, D., & Mayer, B. (2022). Digital Retrofitting of legacy machines: A holistic procedure model for industrial companies. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 36, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.011>
- Teixeira, P., Sá, J. C., Silva, F. J. G., Ferreira, L. P., Santos, G., & Fontoura, P. (2021a). Connecting lean and green with sustainability towards a conceptual model. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129047. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129047>
- Teixeira, P., Sá, J. C., Silva, F. J. G., Ferreira, L. P., Santos, G., & Fontoura, P. (2021b). Connecting lean and green with sustainability towards a conceptual model. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129047. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129047>

-
- Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975–2987.
- Touriki, F. E., Benkhati, I., Kamble, S. S., Belhadi, A., & El fezazi, S. (2021). An integrated smart, green, resilient, and lean manufacturing framework: A literature review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128691>
- Toussaint, M., Krifa, S., & Panetto, H. (2024). Industry 4.0 data security: A cybersecurity frameworks review. *Journal of Industrial Information Integration*, 39, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100604>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222.
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Bhadauria, A., Sharma, S., Li, C., Pimenov, D. Y., Giasin, K., Singh, S., & Gautam, G. D. (2021). An agile system to enhance productivity through a modified value stream mapping approach in industry 4.0: A novel approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111997>
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Saraswat, S., Sharma, S., Li, C., & Rajkumar, S. (2022). Development of a Data-Driven Decision-Making System Using Lean and Smart Manufacturing Concept in Industry 4.0: A Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3012215>

-
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Saraswat, S., Sharma, S., Li, C., Rajkumar, S., & Georgise, F. B. (2022). A Novel Smart Production Management System for the Enhancement of Industrial Sustainability in Industry 4.0. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–24.
<https://doi.org/10.1155/2022/6424869>
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Sharma, S., Li, C., Singh, S., Hussan, W. U., Salah, B., Saleem, W., & Mohamed, A. (2022). A Sustainable Productive Method for Enhancing Operational Excellence in Shop Floor Management for Industry 4.0 Using Hybrid Integration of Lean and Smart Manufacturing: An Ingenious Case Study. *Sustainability*, 14(12), 7452. <https://doi.org/10.3390/su14127452>
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Sharma, S., Singh, J., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2021). An Innovative Agile Model of Smart Lean–Green Approach for Sustainability Enhancement in Industry 4.0. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(4), 215.
<https://doi.org/10.3390/joitmc7040215>
- Tseng, M.-L., Islam, M. S., Karia, N., Fauzi, F. A., & Afrin, S. (2019). A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 141.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.009>
- Tseng, M.-L., Tran, T. P. T., Ha, H. M., Bui, T.-D., & Lim, M. K. (2021). Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges Toward Industry 4.0: a data driven analysis. *Journal of Industrial and*

Production Engineering, 38(8), 581–598.

<https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1950227>

TURNER, G. (2008). A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality. *Global Environmental Change*, 18(3).

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.05.001>

Umar, M., Khan, S. A. R., Zia-ul-haq, H. M., Yusliza, M. Y., & Farooq, K. (2022a).

The role of emerging technologies in implementing green practices to achieve sustainable operations. *The TQM Journal*, 34(2), 232–249.

<https://doi.org/10.1108/TQM-06-2021-0172>

Umar, M., Khan, S. A. R., Zia-ul-haq, H. M., Yusliza, M. Y., & Farooq, K. (2022b).

The role of emerging technologies in implementing green practices to achieve sustainable operations. *The TQM Journal*, 34(2), 232–249.

<https://doi.org/10.1108/TQM-06-2021-0172>

United Nations. (2024, April 27). *United Nations Statistics Wiki*.

<https://unstats.un.org/wiki/>

U.S. Department of Health & Human Services. (2022, July 3). *Sensores*.

<https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/sensores>

US Environmental Protection Agency. (2007). *The Lean And Environment Toolkit*.

United States Environmental Protection Agency Washington, DC, USA.

US Environmental Protection Agency (EPA). (2024, May 9). *Reduce the Environmental Impact of Your Energy Use*. EPA.

<https://www.epa.gov/energy/reduce-environmental-impact-your-energy-use>

-
- Valentina, D. P., Valentina, D. S., Salvatore, M., & Stefano, R. (2021). Smart operators: How Industry 4.0 is affecting the worker's performance in manufacturing contexts. *Procedia Computer Science*, 180, 958–967. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.347>
- Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019a). Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability. *Sustainability*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/su11051439>
- Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019b). Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/su11051439>
- Verma, N., & Sharma, V. (2021). An I4.0 Review on Lean Green and Six Sigma Based on Energy Parameter. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 12(3), 30–46. <https://doi.org/10.4018/IJSESD.2021070103>
- Verrier, B., Rose, B., & Caillaud, E. (2016). Lean and Green strategy: the Lean and Green House and maturity deployment model. *Journal of Cleaner Production*, 116, 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.022>
- Vilela, A., Marques, C., & Correia, E. (2018). Structural Equation Modelling (SEM) applied to sensory profile of Vinho Verde monovarietal wines. *Food Research International*, 111, 650–660. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.077>
- Villalba-Diez, J., Molina, M., Ordieres-Mere, J., Sun, S., Schmidt, D., & Wellbrock, W. (2020). Geometric Deep Lean Learning: Deep Learning in Industry 4.0

- Cyber-Physical Complex Networks. *SENSORS*, 20(3).
<https://doi.org/10.3390/s20030763>
- Vinodh, S., & Rathod, G. (2010). Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. *Journal of Cleaner Production*, 18(8), 833–842.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.024>
- Voogt, J., & Fisser, P. (2015). Computer-Assisted Instruction. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 493–497). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.92027-0>
- Wahab, A. N. A., Mukhtar, M., & Sulaiman, R. (2013). A Conceptual Model of Lean Manufacturing Dimensions. *Procedia Technology*, 11.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.327>
- Walsh, B. M., Kosik, K. B., Bain, K. A., Houston, M. N., Hoch, M. C., Gribble, P., & Hoch, J. M. (2022). Exploratory factor analysis of the fear-avoidance beliefs questionnaire in patients with chronic ankle instability. *The Foot*, 51, 101902.
<https://doi.org/10.1016/j.foot.2021.101902>
- Wang, K.-H., Umar, M., Akram, R., & Caglar, E. (2021). Is technological innovation making world “Greener”? An evidence from changing growth story of China. *Technological Forecasting and Social Change*, 165, 120516.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120516>
- Wang, Z.-J., & Zhao, L.-T. (2021). The impact of the global stock and energy market on EU ETS: A structural equation modelling approach. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125140.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125140>

-
- Waqar, A., Othman, I., Radu, D., Ali, Z., Almujiabah, H., Hadzima-Nyarko, M., & Khan, M. B. (2023a). Modeling the Relation between Building Information Modeling and the Success of Construction Projects: A Structural-Equation-Modeling Approach. *Applied Sciences*, 13(15), 9018.
<https://doi.org/10.3390/app13159018>
- Waqar, A., Othman, I., Radu, D., Ali, Z., Almujiabah, H., Hadzima-Nyarko, M., & Khan, M. B. (2023b). Modeling the Relation between Building Information Modeling and the Success of Construction Projects: A Structural-Equation-Modeling Approach. *Applied Sciences*, 13(15), 9018.
<https://doi.org/10.3390/app13159018>
- Williams, B., Onsmann, A., & Brown, T. (2010). Exploratory factor analysis: A five-step guide for novices. *Australasian Journal of Paramedicine*, 8, 1–13.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (2007). *The machine that changed the world: The story of lean production--Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry*. Simon and Schuster.
- Womack, J. P., Jones, D. T., Roos, D., & Chaparro, F. O. (1992). *La máquina que cambió el mundo*. McGraw-Hill Madrid.
- Xiaoyi, Z., Yang, H., Kumar, N., Bhutto, M. H., Kun, W., & Hu, T. (2023). Assessing Chinese Textile and Apparel Industry Business Sustainability: The Role of Organization Green Culture, Green Dynamic Capabilities, and Green Innovation in Relation to Environmental Orientation and Business Sustainability. *Sustainability*, 15(11), 8588.
<https://doi.org/10.3390/su15118588>

-
- Xue, X., Zhang, X., Wang, L., Skitmore, M., & Wang, Q. (2018). Analyzing collaborative relationships among industrialized construction technology innovation organizations: A combined SNA and SEM approach. *Journal of Cleaner Production*, 173, 265–277.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.009>
- Yadav, G., Luthra, S., Jakhar, S. K., Mangla, S. K., & Rai, D. P. (2020a). A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120112.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120112>
- Yadav, G., Luthra, S., Jakhar, S. K., Mangla, S. K., & Rai, D. P. (2020b). A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120112.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120112>
- Yang, L., Shen, F., Zhang, L., Cai, Y., Yi, F., & Zhou, C. (2021). Quantifying influences of natural and anthropogenic factors on vegetation changes using structural equation modeling: A case study in Jiangsu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124330.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124330>
- Yang, S., Navarathna, P., Ghosh, S., & Bequette, B. W. (2020). Hybrid Modeling in the Era of Smart Manufacturing. *Computers & Chemical Engineering*, 140, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106874>

-
- Yavuz, O., Uner, M. M., Okumus, F., & Karatepe, O. M. (2023a). Industry 4.0 technologies, sustainable operations practices and their impacts on sustainable performance. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135951. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135951>
- Yavuz, O., Uner, M. M., Okumus, F., & Karatepe, O. M. (2023b). Industry 4.0 technologies, sustainable operations practices and their impacts on sustainable performance. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135951. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135951>
- Yee, F. M., Shaharudin, M. R., Ma, G., Mohamad Zailani, S. H., & Kanapathy, K. (2021). Green purchasing capabilities and practices towards Firm's triple bottom line in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127268>
- Yin, M., Huang, H., & Oldenburg, T. B. P. (2021). An application of exploratory factor analysis in the deconvolution of heavy oil biodegradation, charging and mixing history in southeastern Mexico. *Organic Geochemistry*, 151, 104161. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2020.104161>
- Yu, D., & Ye, T. (2022). Tracing the lean thinking in supply chain management: a comprehensive main path analysis. *International Journal of Lean Six Sigma*. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2022-0135>
- Yu, W., Chavez, R., Jacobs, M., & Wong, C. Y. (2020). Innovativeness and lean practices for triple bottom line: testing of fit-as-mediation versus fit-as-moderation models. *International Journal of Operations & Production*

- Management*, 40(10), 1623–1647. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-07-2019-0550>
- Yu, Y., Xu, J., Huo, B., Zhang, J. Z., & Cao, Y. (2023). The impact of supply chain social responsibility on sustainable performance. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135666. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135666>
- Yu, Y., Zhang, J. Z., Cao, Y., & Kazancoglu, Y. (2021). Intelligent transformation of the manufacturing industry for Industry 4.0: Seizing financial benefits from supply chain relationship capital through enterprise green management. *Technological Forecasting and Social Change*, 172, 120999. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120999>
- Zekhnini, K., Cherrafi, A., Bouhaddou, I., Chaouni Benabdellah, A., & Bag, S. (2021). A model integrating lean and green practices for viable, sustainable, and digital supply chain performance. *International Journal of Production Research*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1994164>
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. (2008). Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation. *International Journal of Production Economics*, 111(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.029>
- Zhu, X., Liang, Y., Xiao, Y., Xiao, G., & Deng, X. (2023). Identification of Key Brittleness Factors for the Lean–Green Manufacturing System in a Manufacturing Company in the Context of Industry 4.0, Based on the DEMATEL-ISM-MICMAC Method. *Processes*, 11(2), 499. <https://doi.org/10.3390/pr11020499>

Zhu, X., Xiao, Y., Xiao, G., & Deng, X. (2022a). Research on Driving Factors of Collaborative Integration Implementation of Lean-Green Manufacturing System with Industry 4.0 Based on Fuzzy AHP-DEMATEL-ISM: From the Perspective of Enterprise Stakeholders. *Processes*, 10(12), 2714.

<https://doi.org/10.3390/pr10122714>

Zhu, X., Xiao, Y., Xiao, G., & Deng, X. (2022b). Research on Driving Factors of Collaborative Integration Implementation of Lean-Green Manufacturing System with Industry 4.0 Based on Fuzzy AHP-DEMATEL-ISM: From the Perspective of Enterprise Stakeholders. *Processes*, 10(12), 2714.

<https://doi.org/10.3390/pr10122714>

Zhu, X., Xiao, Y., Xiao, G., & Deng, X. (2022c). Research on Driving Factors of Collaborative Integration Implementation of Lean-Green Manufacturing System with Industry 4.0 Based on Fuzzy AHP-DEMATEL-ISM: From the Perspective of Enterprise Stakeholders. *Processes*, 10(12), 2714.

<https://doi.org/10.3390/pr10122714>

Zoubek, M., Poor, P., Broum, T., Basl, J., & Simon, M. (2021). Industry 4.0 Maturity Model Assessing Environmental Attributes of Manufacturing Company. *Applied Sciences*, 11(11), 5151.

<https://doi.org/10.3390/app11115151>

Anexos

Anexo 1. Listado de siglas

Categoría	Sigla	Significado
IN4	MES	Sistema de ejecución de la fabricación
	CN	Computación en la nube
	IoT	Internet de las cosas
	IA	Inteligencia artificial
	TICS	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
	SCADA	Control de supervisión y Adquisición de Datos
	SCS	Sistemas de ciber seguridad
	RC	Robots colaborativos
	SI	Simulación
	RA	Realidad aumentada
	RV	Realidad virtual
	BD	Big data
	I3D	Impresión 3d
	IRF	identificación por radio frecuencias
	BC	Block chain
	VA	Vehículos autónomos
	GD	Gemelo digital
	S	Sensores
	D	Digitalización
	AD	Análisis de datos
	EX	Exoesqueleto
	T	Telemetría
	DEL	Dispositivo electrónico
	AUT	Automatización
	AMQ	aprendizaje de máquinas
	SCF	Sistemas ciber físicos
	SE	Sistemas embebidos
	AP	Aprendizaje profundo
	MA	Materiales avanzados
	DR	Drones
TACE	Tecnología avanzada de ciencias energéticas	
TA	Tecnologías aditivas	
PRE	Planificación de recursos empresariales	
Lean	MFV	Mapa de flujo de valor
	F	Flujo
	OI	Optimización de inventarios
	OP	Optimización de procesos
	EMC	Empleados comprometidos
	RCL	Relación clientes

Green

RP	Relación proveedores
MC	Mejora continua
PT	Planificación del tiempo
5PQ	cinco ¿por qué?
EZ	Estandarización
EDP	Eliminación de desperdicios
RE	Reingeniería
CLP	Colaboración con proveedores
CC	Colaboración con clientes
CLT	Calidad total
MPT	Mantenimiento productivo total
KN	Kanban
P	Poka-yoke
K	Kaizen
JIT	Justo a tiempo
J	Jidoka
H	Heijunka
A	Andon
FV	Fabrica visual
SS	Six sigma
GW	Gemba walk
PDC	Planear, hace, verificar, actuar
L	Liderazgo
SMED	Gestión de la producción
CES	Control estadístico
O	Obeya
EGQ	Eficiencia general de los equipos
PD	Pronóstico de demanda
ORT	Optimización de rutas de transporte
SPL	Selección de proveedores locales
FC	Fabricación celular
CP	Control de la producción
5S	SEIRI, SEITON, SEISO, SEIKETSU ,SHITSUKE
PLL	PULL
RAP	Retro alimentación del proveedor
MARE	Manufactura reconfigurable
CAC	Cooperación ambiental con el cliente
CAP	Cooperación ambiental con el proveedor
ED	Ecodiseño
CVP	Ciclo de vida del producto
CV	Compras verdes

Económico/Operacional

MV	Manufactura verde
LI	logística inversa
SGA	Sistema de gestión ambiental
EC	Economía circular
REC	Reciclaje
SCEF	sistema cibernético de energía física
6R	Rediseñar, Reducir, Reutilizar, Reparar, Renovar, Recupera
CGVG	Compromiso de gestión verde de la gerencia
EDV	Eliminación de desperdicios verdes
CEM	Control de emisiones
FAE	Formación ambiental de los empleados
ECOF	Ecoeficiencia
CAM	Certificación ambiental
C	Costos
TO	Tiempo de operación
RI	Rentabilidad de la inversión
U	Utilidad
TE	Tiempo de espera
TP	Tiempo de producción
FL	Flexibilidad
TIM	Tiempo de inactividad de máquinas
UODAI	Utilidad operacional más depreciaciones y amortización
RAD	Rentabilidad del activo
TD	Tasa de defectos
NI	Niveles de inventarios
UP	Unidades producidas
CTR	Ciclo de trabajo
TVA	Tiempo de valor agregado
R	Rotación
CM	Cuota de mercado
TEQ	Tasa de efectividad del equipo
HE	Horas extra
HU	Horas de ausencia de los empleados
MP	Mejora del producto
CA	Costos ambientales
V	Ventas
REN	Rentabilidad
EFI	Eficiencia
RSV	Rentabilidad sobre ventas
RIN	Rotación de inventarios
TR	Tiempo de recogida

	EDP	Eliminación de desperdicios
	OP	Optimización de procesos
	MI	Mejora en la imagen
Ambiental	GEI	Gases efecto invernadero
	EM	Emisiones
	DA	Desperdicios de agua
	DSOL	Desperdicios de solidos
	DE	Desperdicios de energía
	MT	Materiales tóxicos
	AM	Accidentes ambientales
	DAM	Desperdicios ambientales
	HC	Huella de carbono
	CE	Consumo de energía
	3R	Reduce, Reutiliza, Recicla
	IV	Imagen verde
	CNA	Cumplimiento de la normatividad ambiental
Social	ST	Seguridad en el trabajo
	ERG	Ergonomía
	SLT	Salud en el trabajo
	RS	Remuneración salarial
	BCL	Buenas condiciones laborales
	TFL	Trabajo Flexible
Método	CT	Capacitación trabajadores
	EDC	Estudio de caso
	ENM	Encuesta empírica
	ECONO	Econométrico
	ARMPS	Adaptive real-time multi-task priority-based scheduling (
	FUZ	FUZZY
	ISM	Interpretive structural modeling
	RSL	Revisión sistemática de la literatura
	MCP	Modelo conceptual
	MEI	Modelo estructural interpretativo
	AFE	Análisis factorial exploratorio
	AFC	Análisis factorial confirmatorio
	MM	Modelo de madurez
	SEM	Modelo de Ecuaciones estructurales
	AGP	Aprendizaje geométrico profundo
	MTR	Multitarea en tiempo real
	BWM	Best-worst (BWM)
	B	Bibliometría
	GF	Grupo focal

	MEIO	Multi - layer Enterprise Input - Output
	MUL	Multicriterio
	E	Estadístico

Nota: Realización propia

Anexo 2. Encuesta Desarrollada

Instrumento de recolección de información de la tesis de doctorado en ingeniería de procesos (EAN) sobre la Industria 4.0 prácticas Lean y Verdes con el desempeño sostenible

Dirigida a empresas del Sector Manufacturero en Santander.

Reciba un cordial saludo de parte del grupo de investigación Dirección y Gestión de Proyectos de la Universidad EAN y el Grupo de Investigación en Integración y Globalización de los Negocios de la Universidad Santo Tomás.

La presente información busca aportar datos relevantes para el desarrollo del sector manufacturero en Santander a partir de la investigación sobre el efecto que tiene la industria 4.0 en las prácticas Lean y verdes y su impacto en el desempeño sostenible.

Nos gustaría contar con su ayuda mediante el diligenciamiento de esta encuesta. La información recolectada se utilizará estrictamente con fines académicos. Garantizamos la confidencialidad de las fuentes consultadas.

Para esta actividad se envía un cuestionario cuya duración es aproximadamente de 10 minutos. La participación en este estudio es absolutamente voluntaria, esto quiere decir, que, si así lo desea, puede negarse a participar o retirarse en cualquier momento. De la misma manera, no se solicitarán datos personales de identificación por ende su participación será anónima y la información de carácter confidencial solo será utilizada para fines investigativos. En caso de solicitarlo, el/la participante puede tener un resumen del informe final del trabajo de investigación si así lo desea.

Si en dado caso, existe alguna duda en la terminología relacionada con la encuesta, se incluye un glosario con los significados en el siguiente

link <https://drive.google.com/file/d/1N4Tv5Enr0cuUzXPUxObOxzDEFk31Ftg0/view?usp=sharing>

El/ la participante está en el derecho de recibir información actualizada sobre el avance del proyecto en caso de solicitarla. Las circunstancias bajo las cuales se terminaría la participación en el estudio obedece a que no se alcance la muestra necesaria debido a que los participantes no responden. Además, no se recibirá ningún beneficio económico por su participación; ésta será una contribución para la academia y la investigación. Finalmente, no existe ningún riesgo físico, mental o laboral al participar en la investigación.

Para más información sobre la encuesta o los resultados de la investigación puede

contactar al estudiante del doctorado en Ingeniería de procesos y Líder de investigación del grupo Inglong: ALFREDO ENRIQUE SANABRIA OSPINO al teléfono 607 698 58 58 extensión 6548.
correos asanabr45905@universidadean.edu.co; alfredoenrique.sanabria@ustabuca.edu.co.

En la parte inferior de los logos de la universidad esta el botón siguiente para empezar la encuesta

Muchas gracias por su participación.



Acreditada
en Alta Calidad
Res. n.º 29459 del Mineducación,
29/12/17 vigencia 28/12/21



A continuación, encontrará la información sobre el consentimiento informado de la investigación.

1.

Certifico que he sido informado(a) con la claridad y veracidad debida respecto a la investigación en curso; la cual supone mi colaboración en la recolección de información sobre los siguientes puntos: (1) perfil institucional y (2) Efecto de la industria 4.0 en Lean y Verde y desempeño sostenible. *

Marca solo un óvalo.

Sí

No

2. Voluntariedad: Entiendo que mi participación en el presente estudio es voluntaria y * que puedo retirarme en cualquier momento, sin que esto conlleve ningún tipo de penalidad; así como también que los investigadores y evaluadores tienen todo el derecho a retirarse del estudio en cualquier momento.

Marca solo un óvalo.

Sí

No

3. Beneficios: Comprendo que no recibiré ningún tipo de beneficio por participar en * este estudio y aunque mi participación puede no generar un beneficio directo para mí, comprendo que los resultados obtenidos del mismo podrán generar un beneficio futuro para muchas personas.

Marca solo un óvalo.

Sí

No

4. Confidencialidad: He sido informado que se mantendrá la confidencialidad y * anonimato de mis resultados. Solamente personas autorizadas podrán tener acceso a ellos, aunque se mantendrá en reserva mi identidad en todo momento.

Marca solo un óvalo.

Sí

No

5. Riesgos: Considero que mi participación en este proyecto NO representa ningún riesgo físico o psicológico. Si usted responde que "NO", usted saldrá de la investigación, por considerar que ésta es un riesgo para su salud psicológica o física (Si desea participar y considera que no hay ningún riesgo en ello, debe marcar: "Sí"). *

Marca solo un óvalo.

Sí

No

6. Desea recibir el resultado de la presente investigación. *

Marca solo un óvalo.

Sí

No

7. Correo electrónico al que desea recibir el reporte.

8. Nombre de su empresa. *

9. Tipo de empresa. *

Marca solo un óvalo.

- Sociedad Limitada.
- Sociedad Anónima.
- Sociedad colectiva.
- Empresa unipersonal.
- Sociedad comandita simple.
- Sociedad comandita por acciones.
- Empresa asociativa de trabajo.
- Sociedad por acciones simplificada.

10. El tiempo de constitución (en años) de su empresa es: *

11. El número de empleados de su empresa es: *

12. El cargo que desarrolla en su empresa es. *

Marca solo un óvalo.

- Gerente General
- Gerente de Departamento
- Jefe
- Supervisor
- Operario

13. Sector al que pertenece su empresa: *

Marca sólo un óvalo.

- Elaboración de productos alimenticios .
- Elaboración de bebidas.
- Elaboración de productos de tabaco.
- Elaboración de productos textiles.
- Confección de prendas de vestir.
- Curtido y recurtido de cueros; fabricación de calzado; Fabricación de artículos y artículos similares, y fabricación de artículos de talabartería y guarnicionería y teñido de pieles.
- Transformación de la madera y fabricación de productos de madera y corcho; excepto muebles, fabricación de artículos de cestería y espartería.
- Fabricación de papel cartón y productos de papel y cartón.
- Actividades de impresión y de producción de copias a partir de grabaciones originales.
- Coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo y actividad de mezcla de combustible.
- Fabricación de sustancias y productos químicos.
- Fabricación de productos farmacéuticos, Sustancias químicas medicinales y productos botánicos de uso farmacéutico.
- Fabricación de productos de caucho y de plástico.
- Fabricación de otros productos minerales y no metálicos.
- Fabricación de productos Metalúrgicos básicos.
- Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo.
- Fabricación de productos informáticos, electrónico y ópticos.
- Fabricación de aparatos y equipo eléctrico.
- Fabricación de maquinaria y equipo no clasificados previamente.
- Fabricación de vehículos automotores, remolques y semi remolques.
- Fabricación de otros tipos de equipo de transporte.
- Fabricación de muebles colchones y somieres.
- Fabricación de joyas, bisutería y artículos conexos
- Fabricación de instrumentos musicales
- Fabricación de artículos y equipos para la práctica del deporte
- Fabricación de instrumentos, aparatos y materiales médicos y odontológicos (incluidos inmobiliario)

- Instalación , mantenimiento y reparación especializado de maquinaria y equipo.
- Fabricación de juegos, juguetes y rompecabezas

En esta sección se evaluará el nivel de implementación de la **industria 4.0** en su empresa relacionado con el **manejo y disposición de la información**.

Para las siguientes preguntas califique de **1 a 10**, siendo 10 la máxima calificación:

¿Qué tanto ha implementado las siguientes **tecnologías** en su empresa?

Nota: Si la calificación que desea no aparece en la escala de su computador desplácese hacia la derecha con la flecha del teclado →, o en la parte inferior de la pregunta hay una barra de desplazamiento que la puede mover hacia la derecha. Si está realizando la encuesta desde su celular y no aparece la calificación deseada de forma táctil puede deslizar la pantalla hacia la izquierda.

14. *

Marca sólo un óvalo por fila.

	1	2	3	4	5	6	7	8	
Disposición y uso de información en la nube.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	(
Analítica de datos.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	(
Analítica de grande datos (Big data).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	(
Inteligencia de negocios (business intelligence).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	(
Internet de las cosas (IoT).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	(

En esta sección se evaluará el nivel de implementación de las **industria 4.0** en su empresa relacionado con la **automatización**

Para las siguientes preguntas califique de 1 a 10 siendo 10 la máxima calificación.

¿Que tanto ha implementado las siguientes tecnologías en su empresa?

Nota: Si la calificación que desea no aparece en la escala de su computador desplácese hacia la derecha con la flecha del teclado →, o en la parte inferior de la pregunta hay una barra de desplazamiento que la puede mover hacia la derecha. Si está realizando la encuesta desde su celular y no aparece la calificación deseada de forma táctil puede deslizar la pantalla hacia la izquierda.

15. *

Marca solo un óvalo por fila.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Sensores.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Robótica y automatización.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manufactura aditiva/impresión 3D.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Inteligencia artificial.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Realidad virtual/aumentada.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aprendizaje automático (Machine learning).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En esta sección se evaluará el nivel de implementación de las **prácticas LEAN** en su empresa.

Para las siguientes preguntas, califique de 1 a 10 siendo 10 la máxima calificación .

¿Que tanto ha implementado las siguientes **prácticas LEAN** en su empresa?

Nota: Si la calificación que desea no aparece en la escala de su computador desplácese hacia la derecha con la flecha del teclado →, o en la parte inferior de la pregunta hay una barra de desplazamiento que la puede mover hacia la derecha. Si está realizando la encuesta desde su celular y no aparece la calificación deseada de forma táctil puede deslizar la pantalla hacia la izquierda.

Sistema de gestión ambiental (ISO 14001 u otros).

Programas para la divulgación voluntaria de información sobre desempeño ambiental.

En esta sección se evaluará el **DESEMPEÑO FINANCIERO** de su empresa.

Valore el desempeño con respecto al año anterior califique de 1 a 10 siendo 10 la máxima calificación, con las siguientes afirmaciones:

Nota: Si la calificación que desea no aparece en la escala de su computador desplácese hacia la derecha con la flecha del teclado →, o en la parte inferior de la pregunta hay una barra de desplazamiento que la puede mover hacia la derecha. Si está realizando la encuesta desde su celular y no aparece la calificación deseada de forma táctil puede deslizar la pantalla hacia la izquierda.

18. *

Marca solo un óvalo por fila.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Disminución del costo del consumo de energía.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disminución del costo de los materiales comprados.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mejoramiento del retorno de la inversión.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mejoramiento de las ganancias por acción.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En esta sección se evaluará el **DESEMPEÑO AMBIENTAL** de su empresa.

Valore el desempeño con respecto al año anterior califique de 1 a 10 siendo 10 la máxima calificación, con las siguientes afirmaciones:

Nota: Si la calificación que desea no aparece en la escala de su computador desplácese hacia la derecha con la flecha del teclado →, o en la parte inferior de la pregunta hay una barra de desplazamiento que la puede mover hacia la derecha. Si está realizando la encuesta desde su celular y no aparece la calificación deseada de forma táctil puede deslizar la pantalla hacia la izquierda.

19. *

Marca solo un óvalo por fila.

	1	2	3	4	5	6	7
Disminución de los residuos (agua y/o sólidos).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disminución del consumo de materiales peligrosos/nocivos/tóxicos.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aumento de la energía ahorrada debido a la conservación y la eficiencia en las mejoras.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disminución en las emisiones al aire.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En esta sección se evaluará el **DESEMPEÑO SOCIAL** de su empresa.

Valore el desempeño con respecto al año anterior califique de **1** a **10**, siendo 10 la máxima calificación, con las siguientes afirmaciones:

Nota: Si la calificación que desea no aparece en la escala de su computador desplácese hacia la derecha con la flecha del teclado →, o en la parte inferior de la pregunta hay una barra de desplazamiento que la puede mover hacia la derecha. Si está realizando la encuesta desde su celular y no aparece la calificación deseada de forma táctil puede deslizar la pantalla hacia la izquierda.

20. *

Marca solo un óvalo por fila.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejoramiento en la seguridad y salud en el trabajo de los empleados.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mejoramiento en el bienestar general de las partes interesadas.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mejoramiento en la salud y seguridad de la comunidad.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disminución de los impactos ambientales y riesgos para la comunidad.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios

Anexo 3. Glosario términos Industria 4.0 y Lean

1.Industria 4.0: Método de producción que acelera la consecución de los objetivos de los empresarios, logrando la interacción de forma experta del

componente humano con los sistemas tecnológicos (Beier et al., 2020; Javaid et al., 2021; Sony & Naik, 2020)

2. Disposición y uso de información de su empresa, en la nube: " La información en lugar de almacenarse en sus discos duros o memorias locales, están disponibles en servidores remotos y se puede acceder a ellos a través de Internet" (Dominique & Crégo, 2018).

3. Análisis de datos: "Se fundamenta en la aplicación de estadísticas, programación informática y creación de modelos para descubrir información útil en la toma de decisiones" (DePamphilis, 2019).

4. Análisis de grandes datos: (Big data): "Se define como la forma de crear valor a través de la recopilación, integración y análisis de muchos conjuntos de datos grandes de diferentes fuentes" (Loshin, 2013).

5. Inteligencia de negocios: "Soporte técnico, tecnológico y de procedimientos que recopila, almacena y analiza datos e información producidos por las tareas de la empresa" (Frankenfield, 2022).

6. Internet de las cosas (IoT): "Red de Objetos comunes que generalmente incorporan un tipo de tecnología integrada, de sensores, electrónica, software y conectividad para detectar, comunicarse o interactuar con sus estados internos y/o el externo, con el objetivo de intercambiar datos con un fabricante, o un

proveedor de servicios u otros elementos conectados” (Dominique & Crégo, 2018).

7. Sensores: Herramientas que detectan y responden a algún tipo de información del entorno físico, como por ejemplo s de corriente eléctrica, magnéticos o de radio, sensores de humedad, sensores de velocidad o flujo de fluidos, sensores de presión, sensores térmicos o de temperatura, sensores ópticos, sensores de posición, sensores ambientales y sensores químicos(U.S. Department of Health & Human Services, 2022).

8.Robótica y automatización: “Es el uso de Softwares que imitan las tareas que hace un trabajador mediante el uso de aplicaciones informáticas para automatizar proceso”(Syed et al., 2020).

9. Manufactura aditiva: “Modelado o diseño en 3D asistido por computadora que permite la fabricación sin necesidad de planificar el proceso directamente ahorrando tiempo en el ciclo”(Kumar & Prasad, 2021).

9. Impresión 3D: “Método capaz de reproducir un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material, cuyo diseño se realiza en computadora. El proceso consiste en añadir material capa por capa y desde abajo hacia arriba” (Universidad de la empresa, 2022).

10.Inteligencia artificial: “Método que pretende programar la computadora para que piense como un humano, permitiendo a las computadoras aprender de

los datos y soluciones aproximadas para funciones compleja” (Elbeltagi et al., 2022; Sennewald, 2011).

11. Realidad virtual: “Interfaz Gráfica de usuario que presenta un entorno interactivo, tridimensional e inmersivo generado por computadora al que se accede y manipula usando, por ejemplo, auriculares estéreo, gafas de televisión estéreo montadas en la cabeza y guantes de datos” (Brey & Søraker, 2009).

12. Realidad aumentada: “Es una vista de un entorno u objeto físico del mundo real, cuyos elementos se aumentan (complementan) mediante entradas generadas por computadora, como sonido, video, gráficos o datos de GPS” (Voogt & Fisser, 2015).

13. Aprendizaje de maquina (Machine learning): “Subconjunto de la inteligencia artificial que permite que las máquinas aprendan y mejoren su rendimiento sin ser programadas explícitamente; por lo tanto, actúan inteligentemente” (Shafiullah et al., 2022).

14. Prácticas Lean: “Conjunto de prácticas que permite identificar desperdicios industriales por medio de la mejora continua, produciendo de acuerdo con la demanda del cliente”(Silva, 2012)

15. 5s: Práctica Lean que permite eliminar el desperdicio, mediante entornos de trabajos limpios y ordenados (Manzano Ramírez & Gisbert Soler, 2016)

16. Mantenimiento productivo total: Práctica Lean para el mantenimiento de maquinaria y equipos con el fin de lograr una producción sin: averías, paradas, defectos ni accidentes(Lean production, 2022).

17. Kaizen: “Práctica Lean que centra la imaginación creativa en la mejora continua de los procesos de fabricación, ingeniería, servicios o cualquier actividad empresarial”(Kiran, 2022)

18. Kanban: “Práctica Lean para el control de existencias de inventario que activa la señal para la producción del producto en función de los requisitos reales del cliente”(Naufal et al., 2012)

19. Justo a tiempo: “Práctica Lean que permite del manejo eficiente de materiales, proporcionándolos en la cantidad y calidad correcta, con el fin de eliminar o reducir los residuos, produciendo de este modo el valor máximo para el cliente”(Hernández et al., 2017).

20. Mejora continua: “Práctica Lean que planifica organiza procesos de cambio continuo e incremental” (Garcia-Sabater & Marin-Garcia, 2011)

Anexo 4. Encuesta de validación del modelo

FORMATO DE EVALUACIÓN – MODELO SEM- INDUSTRIA 4.0 LEAN Y VERDE EN EL DESEMPEÑO SOSTENIBLE

[Iniciar sesión en Google](#) para guardar lo que llevas hecho. [Más información](#)

* Indica que la pregunta es obligatoria

La presente tiene por finalidad solicitar su valiosa colaboración como juez experto para la evaluación del **Modelo estadístico realizado con la técnica de ecuaciones estructurales (SEM)** en el sector manufacturero de Santander en el marco del doctorado en Ingeniería de proceso de la universidad EAN.

Por esta razón agradezco su valiosa colaboración, evaluando el Modelo en referencia a: la confiabilidad y validez junto con las observaciones que considere sean pertinentes.

OBJETIVO: Establecer la validez del Modelo SEM con el fin de determinar el efecto directo e indirecto que tiene la industria 4.0, en apoyo a las prácticas Lean y Verdes en el desempeño sostenible.

INSTRUCCIONES: Señor (a) juez tome en cuenta las siguientes instrucciones para evaluar la validez del modelo.

A. El análisis Factorial exploratorio (AFE) presenta pruebas estadísticas y medidas de Confiabilidad y Validez aceptadas.

B. El análisis Factorial Confirmatorio (AFC) presenta pruebas estadísticas, medidas de Confiabilidad, Validez e indicadores de ajuste aceptados.

C. El Modelo estructural SEM presenta indicadores de ajuste aceptados.

En la parte inferior de los logos de la universidad esta el botón siguiente para empezar la Evaluación

A. Análisis Factorial exploratorio (AFE)

1. ¿El modelo cumple con un valor de Kaiser -Meyer_Olkin (KMO) mayor a 0.5? *

(Hair et al. 2010; Lu et al. 2020; Raut et al. 2019; Walsh et al. 2022)

- SI
- NO

1. Comentarios *

Tu respuesta _____

2. ¿El modelo cumple con la prueba de Bartlett con un nivel de significancia menor al 5%? *

(Hair et al. 2010; Lu et al. 2020; Raut et al. 2019; Walsh et al. 2022)

- SI
- NO

2. Comentario *

Tu respuesta _____

3. ¿El modelo cumple con el coeficiente de fiabilidad Alfa de Cronbach mayor o igual a 0.70? *

(Hair et al., 2010; Lu et al., 2020; Raut et al., 2019; Walsh et al., 2022)

SI

NO

3. Comentario *

Tu respuesta

4. ¿El modelo cumple con un valor mínimo de comunalidades de 0.40? *

(Osborne et al. 2008).

SI

NO

4. Comentario *

Tu respuesta

5. ¿El modelo cumple con un valor mínimo de varianza total explicada de 50% por dimensión?

(Streiner, 1994).

Sí

No

5. Comentario

Tu respuesta

[Siguiete](#)

[Borrar formulario](#)

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.

Este formulario se creó en Universidad EAN. [Denunciar abuso](#)

Google Formularios

B. Análisis Factorial Confirmatorio (AFC)**FIABILIDAD DE LOS CONSTRUCTOS**

6. ¿El modelo cumple con un valor de fiabilidad Convergente (CR) igual o superior a 0.70? *

(Al-Haddad et al. 2022; Chin 1998; Ebrahim and Alothman 2022; Sadiq et al. 2021).

SI

NO

6. Comentario *

Tu respuesta _____

7. ¿El modelo cumple con un valor de cargas factoriales mayor o igual a 0.60? *
(Chin, Gopal, and Salisbury 1997).

SI

No

7. Comentario *

Tu respuesta _____

8. ¿El modelo cumple con un valor de varianza media extraída (AVE) de mayor o igual a 0.50? *

(Al-Haddad et al. 2022; Ebrahim and Alothman 2022; Fornell 1985) .

SI

No

8. Comentario *

Tu respuesta _____

9. ¿El modelo cumple con un valor de AVE mayor a los de los valores máximos de la varianza compartida (MSV). *

(Ebrahim and Alothman 2022; Rakis et al. 2022).

SI

No

9. Comentario *

Tu respuesta _____

10. ¿El modelo cumple con un valor de coeficiente de confiabilidad máxima **Max R(H)** mayor o igual a 0.70? *

(Gaskin and Lim 2017; Hair et al. 2010).

SI

No

10. Comentario *

Tu respuesta _____

11. ¿El modelo cumple con un valor de raíz cuadrada del **AVE** mayor a las correlaciones de los ítems? *

(Ebrahim and Alothman 2022; Fornell and Larcker 1981; Rakib et al. 2022).

SI

No

11. Comentario *

Tu respuesta _____

12. ¿El modelo cumple con un valor menor de 0.90 del criterio Heterotrait-Monotrait (HTMT)? *

(Almufarreh and Arshad 2023; Mia et al. 2022; Waqar et al. 2023)

- SI
- NO

12. Comentario *

Tu respuesta

Validación del modelo de medición

13. ¿El modelo cumple con un valor de chi cuadrado χ^2 /Grados de libertad entre 1 y 3? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

13. Comentario *

Comparaciones de referencia

14. ¿El modelo cumple con un valor de índice de ajuste incremental (IFI) mayor a 0.9? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

14. Comentario *

Tu respuesta

15. ¿El modelo cumple con un valor de índice Tucker-Lewis (TLI) mayor a 0.9? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

15. Comentario *

Tu respuesta

16. ¿El modelo cumple con un valor de Índice de ajuste comparativo (CFI) mayor * a 0.9?

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

16. Comentario *

Tu respuesta

Medidas ajustadas por parsimonia

17. ¿El modelo cumple con un valor de Índice de ajuste normado de parsimonia * (PNFI) mayor a 0.5?

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

17. Comentario *

Tu respuesta

18. ¿El modelo cumple con un valor de Índice de de parsimonia fija comparativa (PCFI) mayor a 0.6? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

18. Comentario *

Tu respuesta

Error cuadrático medio RMSEA

19. ¿El modelo cumple con un valor de RMSEA entre 0.06 y 0.08? *

Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

19. Comentario

C. Modelo estructural SEM**Validación del modelo estructural**

20. ¿El modelo cumple con un valor de Chi cuadrado(χ^2)/Grados de libertad entre 1 y 3? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

SI

No

20. Comentario *

Tu respuesta

Comparaciones de referencia

21. ¿El modelo cumple con un valor de índice de ajuste incremental (IFI) mayor a 0.9? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

SI

No

22 ¿El modelo cumple con un valor de índice Tucker-Lewis (TLI) mayor a 0.9? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- Sí
- No

22. Comentario *

Tu respuesta

23. ¿El modelo cumple con un valor de Índice de ajuste comparativo (CFI) mayor a 0.9? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- Sí
- No

23. Comentario *

Tu respuesta

Medidas ajustadas por parsimonia

24. ¿El modelo cumple con un valor de Índice de ajuste normado de parsimonia * (PNFI) mayor a 0.5?

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- NO

24. Comentario *

Tu respuesta

25. ¿El modelo cumple con un valor de Índice de de parsimonia fija comparativa (PCFI) mayor a 0.6? *

(Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

- SI
- No

25. Comentario *

Tu respuesta

RMSEA Error cuadrático medio

26. ¿El modelo cumple con un valor de **RMSEA** entre 0.06 y 0.08? *

Hair et al. 2010; Hu and Bentler 1999)

Sí

No

26. Comentario *

Tu respuesta

MUCHAS GRACIAS



Acreditada
en Alta Calidad
Res. # 2659 del Ministerio
28/12/17 vigencia 28/12/21



[Atrás](#)

[Enviar](#)

[Borrar formulario](#)

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.

Este formulario se creó en Universidad EAN. [Denunciar abuso](#)