



Institución Universitaria

Modelo de dinámica de sistemas para el análisis de la transición hacia procesos de eco-innovación en organizaciones

Juan Fernando Pérez-Pérez

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Medellín, Colombia

2019

Modelo de dinámica de sistemas para el análisis de la transición hacia procesos de eco-innovación en organizaciones

Juan Fernando Pérez-Pérez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en gestión de la innovación tecnológica, cooperación y desarrollo regional

Director:

MSc Juan Felipe Parra Rodas

Codirectora:

MSc Jakeline Serrano García

Línea de Investigación:

Gestión tecnológica, de la innovación y el conocimiento

Grupo de Investigación:

Ciencias económicas y administrativas

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

Medellín, Colombia

2019

A mi madre y hermana.

Agradecimientos

A mis directores Jakeline Serrano por haberme acompañado en la formulación y desarrollo de la investigación y que creyó en mi desde el comienzo. Y Juan Felipe Parra quien fue guía y apoyo en el cumplimiento de mis objetivos.

Resumen

Los estudios y medidas para mitigar los efectos del cambio climático están tomando cada vez más importancia por parte de los académicos, las empresas, los gobiernos y la sociedad en general, y una opción es llevar a cabo actividades sostenibles en áreas de producción en todas las organizaciones del sector manufactura. Con esto, el objetivo de este trabajo de investigación es diseñar un modelo genérico para analizar las dinámicas que se presentan en la implementación de procesos de eco-innovación en organizaciones del sector manufactura por medio de la modelación y simulación computacional empleando dinámica de sistemas. Aplicando el modelo computacional se evaluaron tres estrategias: contratación de personal con experiencia y conocimientos en temas sostenibles, eficiencia en el uso de materias primas y aplicación de una tasa de producción ecológica, las cuales permitieron analizar su comportamiento en ambiente simulado para que sirvan como insumo para la toma de decisiones en una organización. Se logra identificar evidentemente la importancia de la inversión en capacitación de personal en asuntos de sostenibilidad y en equipos más eficientes, los cuales permiten la disminución de costos y consumo de energía. Por lo cual se propone aplicar este modelo genérico en un caso de estudio real que permita validarlo y ajustarlo y comprobar los resultados expuestos.

Palabras clave: eco-innovación, sostenibilidad, dinámica de sistemas, estrategias, políticas

Abstract

Studies and measures to mitigate the effects of climate change are becoming increasingly important on the part of academics, businesses, governments, and society in general, and one option is to carry out sustainable activities in areas of production in all the organizations in the sector manufacturing. With this, the objective of this research work is to design a generic model to analyze the dynamics that arise in the implementation of eco-innovation processes in the manufacturing sector organization through modeling and computational simulation using system dynamics. Applying the computational model, three strategies were evaluated: hiring of personnel with experience and knowledge in sustainable subjects, efficiency in the use of raw materials and application of an ecological production rate, which allowed analyzing their behavior in simulated environment to serve as an input for decision making in an organization, evidencing the importance of investing in personnel training in matters of sustainability and more efficient equipment that allows the reduction of costs and energy consumption. Therefore, it is proposed to apply this generic model in the case of a real study that allows to validate it and adjust it and check the exposed results.

Keywords: eco-innovation, sustainability, system dynamics, strategies, politics

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Eco-innovación y desarrollo sostenible	5
2. Planteamiento del problema de investigación	9
2.1 Descripción del problema	9
2.2 Antecedentes – Estado del arte.....	10
2.2.1 Metodologías de ecodiseño	12
2.2.2 Métodos de análisis multivariado	13
2.2.3 Metodologías de construcción de escenarios.....	15
2.2.4 Metodologías de modelado y simulación.....	17
2.3 Objetivo general	20
2.4 Objetivos específicos	20
3. Metodología	21
3.1 Selección de la metodología.....	21
3.2 Dinámica de sistemas.....	23
3.2.1 Identificación de variables y definición del problema	24
3.2.2 Diseño del diagrama causal.....	25
3.2.3 Formulación del modelo	25
3.2.4 Diseño del modelo matemático	25
3.2.5 Validación del modelo	26
3.2.6 Diseño de estrategias.....	27
4. Resultados.....	29
4.1 Identificación de variables	29
4.1.1 Selección de variables	31
4.2 Diseño del modelo computacional.....	34
4.2.1 Diseño de diagrama causal.....	34
4.3 Diagrama de flujos y niveles	37
4.4 Resultados de simulación	43
4.5 Validación del modelo	48
4.5.1 Pruebas de estructura	48
4.5.2 Pruebas de comportamiento	48
4.5.3 Pruebas de valores extremos	50
4.5.4 Análisis de sensibilidad.....	51
4.5.5 Prueba de error de integración.....	53
4.6 Diseño de estrategias	54
4.6.1 Simulación y evaluación de estrategias.....	54

5. Discusión	62
5.1 Conclusiones.....	63
5.2 Recomendaciones.....	64
A. Anexo: Formulario de validación de expertos	66
B. Anexo: Identificación de variables determinantes para el proceso de eco-innovación....	67
C. Anexo: Diagrama de niveles y flujos del sistema completo.....	68
Bibliografía	71

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso de modelado en DS	24
Figura 2. Proceso metodológico	28
Figura 3. Redes de citación entre autores	30
Figura 4. Variables exógenas y endógenas	31
Figura 5. Esquema general del modelo de simulación	35
Figura 6. Diagrama causal del sistema de producción	36
Figura 7. Submodelo equipos	38
Figura 8. Submodelo financiero.....	40
Figura 9. Submodelo personal	41
Figura 10. Submodelo producción	43
Figura 11. Comportamiento variable equipos.....	44
Figura 12. Comportamiento variable demanda.....	45
Figura 13. Comportamiento variable de costos	46
Figura 14. Comportamiento variable de costos desagregados	46
Figura 15. Comportamiento variable de inversión en tecnología	46
Figura 16. Comportamiento variable costos sin inversión en equipos ECO	46
Figura 17. Comportamiento variable capacidad instalada Fuente: elaboración propia	47
Figura 18. Comportamiento variable producción	47
Figura 19. Comportamiento variable desechos.....	47
Figura 20. Simulación Fracción de capacidad	49
Figura 21. Simulación Equipos tradicionales vs. Equipos ECO.....	50
Figura 22. Modificación Tasa de contacto	50
Figura 23. Prueba flujo de demanda cero vs normal.....	50
Figura 24. Prueba flujo de empleados cero vs normal	50
Figura 25. Prueba flujo de adquisición de materia prima cero vs normal (nivel Inventario de productos).....	51
Figura 26. Prueba flujo de adquisición de materia prima cero vs normal (nivel Inventario MP)....	51
Figura 27. Modificación Fracción de conversión	52
Figura 28. Modificación Tasa de crecimiento demanda	52
Figura 29. Modificación Tasa de producción	53
Figura 30. Modificación del tipo de integración.....	54
Figura 31. Modificación del paso de integración.....	54
Figura 32. Modificación estructura de personal	56

Figura 33. Capacidad instalada con estrategia de contratación de personal	56
Figura 34. Capacidad instalada sin estrategia de contratación de personal	56
Figura 35. Variable Inventario de productos con estrategia de contratación de personal	57
Figura 36. Variable Inventario de productos sin estrategia de contratación de personal	57
Figura 37. Modificación estructura de adquisición de materia prima	58
Figura 38. Variable Inventario de productos con estrategia de uso de menor MP	58
Figura 39. Variable Inventario de productos sin estrategia de uso de menor MP	58
Figura 40. Variable Costos Totales con estrategia de uso de menor MP	59
Figura 41. Variable Costos Totales sin estrategia de uso de menor MP	59
Figura 42. Modificación estructura tasa de producción	60
Figura 43. Variable Inventario de productos con estrategia de variación tasa de producción	60
Figura 44. Variable Inventario de productos sin estrategia de variación tasa de producción	60
Figura 45. Variable Costos totales con estrategia de variación tasa de producción	61
Figura 46. Variable Costos Totales sin política de variación tasa de producción	61

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Metodologías identificadas	11
Tabla 2. Definición de las variables del modelo	33
Tabla 3. Sistema de ecuaciones submodelo equipos	38
Tabla 4. Sistema de ecuaciones submodelo financiero	40
Tabla 5. Sistema de ecuaciones submodelo personal	42
Tabla 6. Sistema de ecuaciones submodelo producción	43

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>CAD</i>	Diseño asistido por computador
<i>CER</i>	Ingeniería asistida por computador
<i>CO2</i>	Dióxido de carbono
<i>DS</i>	Dinámica de sistemas
<i>ECO</i>	Ecológico o ecológica
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>I+D</i>	Investigación y desarrollo
<i>I+D+i</i>	Investigación, Desarrollo e innovación
<i>LCA</i>	Análisis de ciclo de vida
<i>MBA</i>	Modelado basado en agentes
<i>MO</i>	Mano de obra
<i>MP</i>	Materia prima
<i>OCDE</i>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
<i>PYMES</i>	Pequeñas y mediana empresas
<i>TRIZ</i>	Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch

Introducción

En las últimas décadas se han venido realizando cumbres, conferencias y eventos que tienen como tema principal el desarrollo sostenible: la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente, Estocolmo, 1972; el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, presentado en Londres, 1987; la Cumbre de la tierra, Rio de Janeiro, 1992; el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático, 1997; la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, 2002; el Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) 2011. El principal interrogante en estos espacios de discusión ha sido ¿cómo hacer para conservar el medio ambiente y los recursos naturales para asegurárselos a las generaciones futuras? Como resultado varios países desarrollados como Noruega, Países Bajos, Alemania y en vía de desarrollo como Qatar, han implementado una serie de políticas orientadas a impulsar un crecimiento económico sostenible, aunque con frecuencia dichas políticas presentan grandes brechas a la hora de incluir dentro de sus alcances reglamentación sobre el agotamiento de recursos, la contaminación ambiental y la injusticia social. No obstante, como resultado del notorio interés en el crecimiento sostenible, ha surgido, entre otros, una creciente literatura científica que estudia la relación entre la producción de bienes, servicios y el medio ambiente (Beltrán-Esteve & Picazo-Tadeo, 2015). Asimismo, la comunidad científica parece estar de acuerdo en que los cambios son inequívocamente causados por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente como consecuencia de diversas actividades humanas (Beltrán-Esteve & Picazo-Tadeo, 2015).

La idea convencional que se tiene del desarrollo económico va asociada con el aumento de los bienes y servicios, lo cual da importancia al concepto del desarrollo basado en la sostenibilidad, que implica satisfacer las necesidades de la generación del presente, garantizando la satisfacción de las generaciones futuras (Beltrán-Esteve & Picazo-Tadeo, 2015; WCED, 1987, p. 43). Como resultado de la globalización, el aumento de la producción de bienes y servicios, efecto del aumento de la población, entre otros, trae consigo consecuencias ambientales negativas, como la extralimitación en la explotación en masa de los recursos naturales y el cambio climático. Una opción es llevar a cabo actividades de sostenibilidad en áreas de producción en todas las organizaciones del

sector manufactura de los países, independientemente de la etapa de desarrollo en que se encuentren y permitiendo replantear la forma de diseñar, fabricar y consumir mediante la implementación de estrategias de innovación responsable (Tyl, Legardeur, Millet, & Vallet, 2013).

Por tanto, surge con gran fuerza el término desarrollo sostenible en el discurso público, buscando precisamente hacer frente a problemáticas de producción poco amigables con el medio ambiente. En esta misma dirección, en tiempos aún más recientes, el término eco-innovación ha dado pie a la necesidad de plantear políticas de estado y estrategias al interior de las organizaciones en pro de minimizar los impactos ambientales negativos resultado de las actividades de producción y consumo (Jo et al., 2015). La eco-innovación como lo menciona Rennings (2000) son todas las acciones que los principales actores del sistema como empresas, políticos y comunidad en general deben llevar a cabo para el desarrollo de nuevas ideas, comportamientos, procesos y productos contribuyendo a una reducción considerable de los impactos ambientales y apuntando al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad.

La implementación de procesos de eco-innovación es una opción para mitigar el impacto al medio ambiente, permitiendo disminuir costos (Arundel & Kemp, 2009), residuos y mejorar el desempeño económico de las empresas. La eco-innovación también puede servir como una opción para alcanzar la diferenciación en los clientes con conciencia ambiental, otorgándoles productos y servicios con mejor calidad y características (Ryszko, 2016). Consecuentemente, la eco-innovación es un insumo para lograr la sostenibilidad, especialmente en el sector de la industria manufacturera (Rashid, Jabar, Yahya, & Shami, 2015), lo cual permite de manera directa a las empresas, disminuir su huella de carbono (Díaz-García, González-Moreno, & Sáez-Martínez, 2015), creando conciencia ambiental al interior de las organizaciones.

Es así como el propósito de este trabajo de investigación es diseñar un modelo de simulación genérico para analizar las dinámicas de los procesos de eco-innovación en una organización por medio de modelación y simulación computacional, convirtiéndose en un insumo para mejorar los procesos de toma de decisiones de empresas del sector manufactura.

El orden de este trabajo de investigación se explica a continuación: en el capítulo uno se presenta de manera resumida los conceptos o constructos necesarios para abordar el problema de investigación, mostrando la relación entre la eco-innovación y el desarrollo sostenible.

Seguidamente, en el capítulo dos se realiza una descripción del problema de estudio, mostrando los antecedentes identificados, el estado del arte y los objetivos que se pretenden alcanzar en el presente trabajo.

Luego, en el capítulo tres se establece la metodología empleada en el desarrollo de la investigación, detallando dicho proceso metodológico. A continuación, en el capítulo cuatro se

evidencian los resultados de simulación del modelo diseñado y las estrategias planteadas con sus respectivos análisis. Más adelante, en el capítulo cinco se muestran las discusiones, las conclusiones y las recomendaciones y trabajo futuro de la investigación.

1. Eco-innovación y desarrollo sostenible

En el presente capítulo se abordan los conceptos necesarios para el desarrollo del trabajo de investigación. El capítulo inicia con una relación entre el concepto de eco-innovación y desarrollo sostenible, luego se muestran la importancia de los procesos de innovación ambiental en las organizaciones.

Existen cuatro términos diferentes para referirse a las innovaciones que disminuyen el impacto negativo al medio ambiente, ellos son: eco-innovación (o innovación ecológica), innovación verde, innovación ambiental e innovación sostenible (Rashid et al., 2015). El informe Brundtland, desarrollado por las Naciones Unidas, fue el que acuñó el término «desarrollo sostenible», definiéndolo como la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. El concepto de desarrollo sostenible supone límites, sino restricciones impuestas por la tecnología actual y la organización social sobre los recursos ambientales y por la capacidad de la biosfera para absorber los efectos de las actividades humanas (Brundtland, 1987, p.24) citado por Díaz-García, González-Moreno & Sáez-Martínez (2015).

Schiederig et al. (2012) citados por Díaz-García et al. (2015) llegaron a la conclusión de que al comparar la definición de eco-innovación con el concepto de desarrollo sostenible acuñado por el informe Brundtland con las nociones de innovación ecológica, innovación verde e innovación ambiental, la diferencia es que el desarrollo sostenible tiene en cuenta aspectos económicos, ecológicos y sociales, mientras que el resto incluye sólo los aspectos económicos y ecológicos. Sin embargo, de los resultados de la revisión de la literatura se observa que los términos innovación verde y eco-innovación son los términos que más se usan en los artículos científicos. Aun así, los tres términos son intercambiables e idénticos.

La eco-innovación en relación con el desarrollo sostenible integrará las tendencias a largo plazo que transformarán los hábitos de consumo, la creación de valor y los procesos materiales; del mismo, mostrará cómo se puede cambiar radicalmente la base de ingresos de una empresa y las necesidades de los clientes, indicará las áreas dónde las habilidades permitirán crecer y, en particular, aumentar su valor añadido (Fussler & James, 1999). Las prácticas de eco-innovación van más allá

de la mera adopción de tecnologías de baja emisión de carbono. De hecho, comprenden la creación y aplicación de nuevos conocimientos, involucrando valores, reglas y capacidades, así como la destrucción creativa de prácticas antiguas (Pacheco, Caten, et al., 2017).

La eco-innovación se puede manifestar en tres tipos de innovaciones: proceso, producto y organización. Los procesos ecológicos están vinculados a nuevos métodos de producción, entre ellos cero emisiones de dióxido de carbono (CO₂), cero pérdidas y eco-eficiencia en la gestión de los recursos naturales; los eco-productos incluyen innovaciones a través de la mejora del producto o cambios radicales a través de ecodiseño, tecnologías sostenibles e ingeniería inversa para minimizar el impacto ambiental de estos productos; la eco-innovación organizacional, por su parte, implica nuevos programas y técnicas vinculadas a los sistemas organizativos e incluye herramientas de evaluación del ciclo de vida, producción más limpia y consumo sostenible (de Oliveira Brasil et al., 2016).

Es así como la eco-innovación es empleada para referirse a bienes y servicios, o procesos en una organización que aporta al desarrollo sostenible. Es utilizar el conocimiento que se posee para modificar los procesos de producción industrial encaminada a generar beneficio ecológico. Este concepto de eco-innovación fue acuñado por los autores estadounidenses Claude Fussler y Peter James en la década de los 90, como la creación de valor a la organización y los beneficiados por los bienes y servicios producidos por ésta, pero minimizando el riesgo negativo que se genera al medio ambiente (Torres-Rivera & Cuevas-Zúñiga, 2012).

Cheng & Shiu (2012) definen la eco-innovación como la producción, la asimilación o la explotación de un producto, de un proceso de producción, de un servicio o de métodos de gestión o empresariales novedosos para la organización (que lo desarrollan o adoptan) y que, a lo largo de su ciclo de vida, reducen los riesgos ambientales, efectos negativos del uso de los recursos (incluido el uso de energía) en comparación con las alternativas existentes. Autores como Bleischwitz, Giljum, Kuhndt & Schmidt-Bleek (2009) establecen que el objetivo primordial de la eco-innovación debe ser la reducción de los flujos de materiales provocados por la actividad humana y el fomento de los objetivos de sostenibilidad.

Asimismo, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), por su parte, añadió claridad al significado de «eco-innovación» destacando las dos características que la distinguen de la innovación. En primer lugar, «es una innovación que refleja el énfasis explícito del concepto en la reducción del impacto ambiental, ya se trate de un efecto o no», y segundo, «no se limita a la innovación en productos, procesos y métodos organizativos, sino que también incluye la

innovación en las estructuras sociales e institucionales» (Organisation for Economic Cooperation and Development, 2009).

Álvarez, Fernández & Romera (2014) citado por Rovira, Patiño & Schaper (2017) argumentan que la eco-innovación

conduce a una economía más competitiva, redistributiva y sostenible, por tres razones claras: mejora la eficiencia en el uso de los recursos y satisface los procesos productivos con menores insumos de materiales y energía; minimiza el deterioro ambiental gracias al menor uso de recursos naturales y a una menor contaminación y, porque genera nuevas demandas de servicios y productos, lo que se traduce en nuevas fuentes de empleo y emprendimiento. (p. 17).

Desde un punto de vista teórico, la presión de los competidores y las estrictas regulaciones gubernamentales son dos fuerzas que están impulsando a las empresas a invertir en iniciativas de eco-innovación. Sin embargo, a diferencia de las economías desarrolladas, las empresas de economías emergentes tienden a tener menos recursos y, a menudo, priorizan iniciativas que no requieren una cantidad significativa de inversión pero son capaces de generar rendimientos financieros rápidos (Yan, Cui, & Gil, 2016).

En la literatura existente sobre la gestión de la eco-innovación, se han utilizado diferentes enfoques para clasificar las iniciativas de innovación relacionadas con el medio ambiente de las empresas. Por ejemplo, en un estudio empírico, Heel (2000) define y mide dos tipos de prácticas de innovación ambiental. Uno se llama «sustitución de materiales» y se mide con base a si una empresa ha modificado sus procesos de producción sustituyendo el uso de materiales no peligrosos o menos peligrosos. El otro se llama «cambio de proceso» y se mide con base a si una empresa ha desarrollado o modificado sus procesos de producción para reducir el desperdicio.

Para Benner & Tushman (2003) las eco-innovaciones basadas en tecnología y proceso son diferentes en varios aspectos importantes. En primer lugar, el enfoque principal de las innovaciones medioambientales basadas en la tecnología es la adopción de tecnologías novedosas y/o avanzadas, mientras que el enfoque de las innovaciones ambientales basadas en procesos está mejorando la eficiencia del proceso a favor de un mayor coeficiente de utilización de la capacidad, procedimientos más sencillos y eliminación de diversas fuentes de residuos en el proceso. En segundo lugar, la adopción de eco-innovaciones basadas en la tecnología no requiere necesariamente una interacción directa con los clientes finales. Por el contrario, a pesar de que la eco-innovación basada en procesos

puede ocurrir dentro de las empresas, su implementación exitosa a menudo requiere de aportes de los clientes. Yan et al. (2016) concluyen que sus resultados proporcionan evidencia de que, incluso en el contexto de las economías emergentes, invertir en innovaciones ambientales puede funcionar positivamente en el desempeño económico de las empresas.

Las innovaciones ambientales basadas en la tecnología proporcionan mejores soluciones y conceptos tecnológicos que las soluciones existentes. Ayudan a reducir los impactos ambientales ya sea reduciendo el consumo de energía o mejorando la recolección de residuos peligrosos (Fronzel, Horbach, & Rennings, 2007). Como resultado de esto las empresas obtienen beneficios económicos, al ahorrar en consumos de energía y disminuyendo emisiones contaminantes.

2. Planteamiento del problema de investigación

En este capítulo se presenta una descripción del problema de investigación. Posteriormente, se muestra el estado del arte actual con relación a cómo se han abordado temáticas similares mediante las diversas metodologías. Por último, el planteamiento del objetivo general y específicos que se desean alcanzar con la presente investigación.

2.1 Descripción del problema

Como resultado de la globalización, el aumento de la producción de bienes y servicios, y el efecto del aumento de la población, las extralimitaciones en la explotación en masa de los recursos naturales están trayendo consigo consecuencias ambientales negativas para el medio ambiente. Este consumismo está llevando a replantear la forma de diseñar, fabricar y consumir mediante la implementación de una estrategia de innovación responsable (Tyl et al., 2013).

Muchos países han implementado una serie de políticas orientadas a impulsar su crecimiento económico sostenible. Aunque con frecuencia dichas políticas presentan aún grandes brechas a la hora de incluir dentro de sus alcances reglamentación sobre el agotamiento de recursos, la contaminación ambiental y la injusticia social. El término desarrollo sostenible en el discurso público busca precisamente hacer frente a estas problemáticas de producción poco amigables con el medio ambiente. Más adelante, el término eco-innovación ha dado pie a la necesidad de plantearse políticas de Estado y estrategias al interior de las organizaciones del sector manufactura que vayan en pro de minimizar los impactos negativos al medio ambiente, producto de las actividades de producción y consumo (Jo et al., 2015).

Es de destacar que, el desarrollo tecnológico trae consigo una serie de beneficios convenientes a la sostenibilidad (Sabina Scarpellini, Aranda-Usón, Marco-Fondevila, Aranda-Usón, & Llera-Sastresa, 2015). No obstante, genera efectos adversos al planeta a largo plazo (Hond & Groenewegen, 1996). Por el contrario, la eco-innovación juega un papel importante en el ahorro de los recursos de manufactura mundial, aunque afronta barreras a la hora de su implementación, como

la falta de políticas ambientales tanto a nivel local como internacional, las necesidades tecnológicas y financieras, así como una escasa cultura de eco-innovación en las industrias (Sabina Scarpellini et al., 2015).

En un mundo donde predominan una gran variedad de procesos industriales de manufactura, y disminución en los recursos naturales, una alternativa viable es llevar a cabo actividades de innovación ecológica para tratar dichos problemas ambientales (Kong, Feng, & Ye, 2016), independiente de la etapa de desarrollo en que se encuentren. Todos los países deben pensar en crear estrategias autosostenibles que generen su cuota en la disminución de emisiones. Asimismo, sus grandes urbes deben implementar soluciones que ayuden a mitigar las consecuencias causadas por su producción y sus procesos asociados. Por eso, incluir procesos de eco-innovación, permite asumir con efectividad los retos ambientales actuales, de esta manera es necesario desarrollar mejores políticas para responder a las exigencias tecnológicas, de procesos, productos y culturales de la eco-innovación en los mercados nacionales e internacionales (Davidescu, Vass Paul, Maria, Gogonea, & Zaharia, 2015).

Rovira, Patiño & Schaper (2017) resaltan en el informe para la Comisión Económica para América Latina y el Caribe en el año 2017 sobre eco-innovación y producción verde, en el cual estudian el caso de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en la región de América Latina y el Caribe, estas enfrentan unas problemáticas relevantes, tales como:

- La baja conciencia que existe sobre el impacto ambiental.
- Las dificultades para el acceso al financiamiento y la inversión.
- La incertidumbre asociada a los costos, tiempos de ejecución y resultados de largo plazo de los nuevos procesos relacionados con la mitigación del impacto ambiental.
- La necesidad de capacitar adecuadamente a su personal.
- El limitado acceso a la información, el conocimiento y la tecnología.
- La baja capacidad para responder a una regulación más estricta.
- Las barreras para participar en los mercados de bienes verdes y cadenas de valor mundiales: alta demanda de recursos financieros.

2.2 Antecedentes – Estado del arte

Como resultado del creciente interés de la sociedad en el crecimiento sostenible, ha surgido de manera gradual literatura científica que estudia la relación entre la producción de bienes, servicios y el medio ambiente (Beltrán-Esteve & Picazo-Tadeo, 2015). La visión convencional del crecimiento

económico como un aumento de la cantidad de bienes y servicios disponibles para satisfacer las necesidades humanas está dando paso progresivamente a un concepto mucho más amplio de crecimiento basado en la sostenibilidad, donde la satisfacción de las necesidades presentes también debe garantizar que las generaciones futuras puedan satisfacer sus necesidades (Beltrán-Esteve & Picazo-Tadeo, 2015; WCED, 1987).

Para la revisión de literatura se utilizó Scopus como base de datos, ya que es una de las fuentes de información de referenciación revisadas por pares académicos y con mayor cobertura de impacto, asimismo, esta base datos posee un número mayor de revistas indexadas (Granda-Orive et al., 2013).

Como primera etapa fueron seleccionados los tesauros relacionadas con el concepto principal del estudio y relacionándolos con las palabras clave que hacen referencias a métodos o metodologías. Lo cual dio como resultado la siguiente ecuación de búsqueda: *TITLE-ABS-KEY(("eco-innovation" OR "sustainable innovation" OR "ecological innovation" OR "green innovation" OR "environmental innovation") AND (tools OR metho* OR model OR technique));* se realizó el proceso de filtración y selección de los artículos.

De los artículos analizados anteriormente se identificaron nueve metodologías tales como: TRIZ (Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch), LCA (análisis de ciclo de vida), análisis factorial, análisis de regresión, modelos de ecuaciones estructurales, prospectiva, análisis multicriterio, dinámica de sistemas (DS) y modelación basada en agentes, utilizadas para abordar el concepto de eco-innovación desde varias perspectivas, siendo clasificadas según su tipología como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Metodologías identificadas

Metodologías para el análisis de eco-innovaciones	Ecodiseño	TRIZ
		Análisis del ciclo de vida
	Análisis multivariado	Modelación de ecuaciones estructurales
		Análisis factorial
		Análisis de regresión
	Escenarios	Análisis multicriterio
		Prospectiva
	Simulación	Dinámica de sistemas
		Modelado basado en agentes

Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de la literatura

A continuación, se describen cada una de las metodologías encontradas para entender cómo se abordó la implementación de eco-innovaciones desde diferentes perspectivas teóricas.

2.2.1 Metodologías de ecodiseño

La responsabilidad social corporativa requiere procesos que sean más respetuosos con el medio ambiente, y el ecodiseño (diseño ecológico) se considera fundamental en la industria manufacturera (Kobayashi, 2006) para la eliminación de posibles impactos negativos al medio ambiente (Hur, Lee, Ryu, & Kwon, 2005; D. Russo, Rizzi, & Montelisciani, 2014). Para llevar a cabo esas actividades se han desarrollado una serie de métodos y herramientas que ayudan a los diseñadores de las organizaciones a generar productos ecológicos, (Tao, Li, Yu, Li, & Yu, 2018) incorporando características ambientales en la etapa inicial de éste.

Dentro de las metodologías enfocadas en el diseño ecológico de productos las empresas han adoptado el LCA como una manera para medir el impacto ambiental de un producto desde su etapa de concepción y diseño, pasando por la extracción y uso de materia prima, hasta el resultado final, siendo ésta última la eliminación del producto como desperdicio (C. C. Cheng & Shiu, 2012; Huber, 2008; Umeda et al., 2012). En el desarrollo del LCA de un producto los diseñadores deben tener en cuenta no sólo dicho ciclo, sino también varios aspectos importantes como la legislación, las necesidades de los clientes, los objetivos estratégicos de la organización, tendencias del mercado y tendencias tecnológicas (Umeda et al., 2012) sin descuidar las funcionalidades del producto (D. Russo et al., 2014; Tao et al., 2018), como resultados de las modificaciones de materiales.

De esta manera la evaluación ambiental incluye la identificación, cuantificación, evaluación y priorización de los aspectos ambientales en relación con un sistema de producción, así como el diseño conceptual del mismo (Hur et al., 2005; Kobayashi, 2006). Pero al identificar los aspectos ambientales de un sistema de producto, no existe un método único o que se prefiera por encima de los demás, ello dependerá en gran medida, de las aplicaciones y necesidades (Hur et al., 2005), por lo que se han hecho integraciones del LCA con otros métodos como TRIZ (Kobayashi, 2006; D. Russo et al., 2014), Diseño Asistido por Computador (CAD), Ingeniería Asistida por Computador (CAE) y optimización que permiten adicionarle, de manera efectiva, atributos medioambientales en el diseño del producto (Tao et al., 2018).

Como se mencionó hay una serie de métodos disponibles que ayudan a los diseñadores a evaluar el ciclo de vida de los productos o que procuran entregar sugerencias sobre cómo diseñar productos (Davide Russo, Regazzoni, & Montecchi, 2011) de acuerdo con los objetivos sostenibles planteados por la compañía, o para el cumplimiento de la legislación actual a la que haya lugar. Para ello, otra metodología destacada en el diseño de productos ecológicos es TRIZ, que significa «Teoría de la resolución de problemas inventiva». Este método se basa en formas universales de resolver problemas y la capacidad de las personas en diseñar soluciones innovadoras (Kobayashi, 2006; Yang

& Chen, 2011). Este método ofrece una caja de herramienta que ayuda a los diseñadores a evitar procedimientos de prueba y error en las etapas de diseño y para resolver problemas de invención (Yang & Chen, 2011).

Dentro de este contexto, Davide Russo et al., (2011) plantean una forma de utilizar la herramienta TRIZ para evaluar e innovar en un sistema técnico, con el objetivo de integrar actividades cotidianas de diseño y lograr resultados sostenibles. Por esa misma línea, Yang & Chen, (2012) propusieron desarrollar la capacidad de resolver problemas de diseño por medio de las herramientas de TRIZ y generar nuevas ideas integrándolo con el razonamiento basado en casos (CBR), ya que éste busca imitar las capacidades del ser humano para recordar experiencias pasadas que permitan la resolución de problemáticas; D. Russo et al., (2014) diseñaron una herramienta llamada “iTTree” que combinan instrucciones que se derivan de resolución de problemas, enfoques de diseño conceptual, mejores experiencias sostenibles y herramientas de simulación como CAD.

Las actividades de eco-innovación se ven representadas principalmente por dos fases: una sobre la evaluación del producto que ya posee la organización y el impacto medioambiental y otra sobre la mejora del producto que acogen algunas consideraciones de diseño. El objetivo principal del LCA es reducir considerablemente el consumo de energía y recursos (Tao et al., 2018; Umeda et al., 2012), las emisiones y el uso de sustancias nocivas. Pero algunos autores como Davide Russo, Schöfer, & Bersano, (2015) aluden sobre su complejidad. Por tanto, tanto TRIZ como LCA han sido probados por expertos según lo que presenta la literatura y han mostrado excelentes resultados en el diseño de productos ecológicos, de acuerdo con el enfoque que se le dé a ambas metodologías y las posibles combinaciones con otros métodos.

2.2.2 Métodos de análisis multivariado

Las innovaciones ambientales han generado grandes atenciones en todos los sectores. Asimismo, una considerable literatura empírica y teórica desde enfoques cuantitativos y cualitativos (Cuerva, Triguero-Cano, & Córcoles, 2014), los cuales han sido necesarios para encontrar relaciones estadísticamente válidas y mejorar la toma de decisiones. Un análisis empírico ha sido el realizado por Pujari (2006), donde se analizó los resultados de la encuesta de proyectos de desarrollo de nuevos productos de Estados Unidos, que permitió explorar la relación y los impactos de las actividades de eco-innovación en el desempeño de nuevos productos ambientales. Los datos del estudio empírico fueron analizados por medio de regresión jerárquica, el cual se empleó para encontrar relaciones estadísticamente significativas entre el desempeño del mercado y varios factores independientes.

Otro aporte en la misma línea es el trabajo realizado por Cuerva et al. (2014) donde examinaron las diferencias entre los factores que influyen en la adopción de innovaciones ecológicas y no ecológicas por medio de un análisis de regresión probit bivariante, dicho procedimiento da la posibilidad de estimar la probabilidad de dos procesos diferentes pero correlacionados; asimismo Sezen & Çankaya (2013) examinaron la influencia que existen entre la mejora de los procesos de la organización y la eco-innovación en el desempeño sostenible de la firma. Se plantearon hipótesis de acuerdo con los datos generados por 53 empresas turcas de diferentes sectores; se realizó un análisis de regresión para probar estadísticamente las hipótesis y definir la dirección de las relaciones establecidas por los autores.

Las innovaciones ambientales incluyen todo tipo de innovaciones económicas, tecnológicas, legales, organizacionales y de comportamiento que permitan una reducción en los daños ambientales (Cuerva et al., 2014). No obstante, se deben evaluar las relaciones que puedan presentarse entre los factores individuales relacionados con el comportamiento y disposición de innovar de una organización para la obtención de resultados más ecológicos. Para ello, las validaciones estadísticas poseen las opciones de análisis de acuerdo con el objetivo de cada estudio. El análisis factorial es otro método de análisis multivariado de validación de datos que se ha empleado para abordar las eco-innovaciones en el sector industrial. Cheng & Shiu (2012) proporcionaron un instrumento que se centra en la implementación de eco-innovación; entendiéndose la implementación de eco-innovación como una serie de actuaciones que se llevan a cabo para generar proyectos específicos que ayuden a mitigar el daño ambiental producto de las actividades industriales. Cheng & Shiu, (2012) emplearon el análisis factorial para identificar dimensionalidades de la eco-innovación y las correlaciones entre las variables definidas en el estudio.

De igual forma Cheng, Yang, & Sheu (2014) investigaron las interrelaciones entre tres tipos de eco-innovación (proceso, producto y organización) y el impacto que ello puede generar en el rendimiento de las organizaciones. Los autores emplearon modelos de ecuaciones estructurales con datos recopilados de 121 empresas de Taiwán. Se evidencian así, efectos directos, indirectos y totales de los tres tipos de las eco-innovaciones en el desempeño de la organización. De igual forma de Oliveira Brasil et al. (2016) investigaron también, por medio de modelos de ecuaciones estructurales, las relaciones que se pueden presentar en los tres tipos de eco-innovaciones, esta vez, el estudio fue aplicado de manera empírica en 70 empresas textiles de Brasil. De acuerdo con los resultados se muestran los efectos directos de las eco-innovaciones organizacionales y de producto en el desempeño de la empresa. De igual manera, se observan los efectos indirectos de éstas de procesos en el rendimiento comercial; asimismo, se resaltan los atributos que poseen cada uno de los tipos de

innovaciones. De ello se concluye entonces que, las empresas deben desarrollar eco-innovaciones organizacionales como primera instancia para el desarrollo de la infraestructura necesaria y el conocimiento que se requiere para impulsar el resto de las innovaciones ecológicas (Cheng et al., 2014; de Oliveira Brasil et al., 2016).

Además, Cunico, Cirani, Lopes, & Jabbour (2017) mostraron que la cooperación tecnológica genera eco-innovaciones, basados en un estudio empírico realizado en el sector agroindustrial de Brasil, analizando el grado de participación de cada uno de los agentes, universidad, empresas y gobierno en dichas interacciones. Esto también fue analizado mediante un modelo de ecuaciones estructurales aplicado por los autores confirmó de manera positiva la participación de los agentes de la cooperación tecnológica en la generación de eco-innovaciones, demostrando el grado de influencia que las variables independientes ejercen sobre las variables dependientes establecidas en el modelo.

2.2.3 Metodologías de construcción de escenarios

Las investigaciones actuales sobre ecología industrial centran sus esfuerzos principalmente en la medición de los impactos que se generan al implementar prácticas ecológicas. Por ello Allwood et al. (2008) proponen un enfoque diferente de posibles cambios prácticos en la producción, como lo es el diseño de nuevos productos, orientado a la generación por medio de lo que ellos llaman *catálogo*, es decir, una serie de escenarios que ayuden a la sostenibilidad. Allwood et al. (2008) manifiestan un gran interés en utilizar el análisis de escenarios como medio para visualizar caminos futuros plausibles para el desarrollo sostenible, ya que estos han venido creciendo recientemente. El paradigma del desarrollo sostenible abarca inherentemente la investigación y el pensamiento futuro, ya que las definiciones y metas se refieren tanto a las generaciones presentes como futuras, y según (Nieto-Romero, Milcu, Leventon, Mikulcak, & Fischer, 2016), la planificación por escenarios se ha convertido en una herramienta importante para batallar con el diseño de futuros inciertos hacia la sostenibilidad.

De igual forma Dias, Vianna, & Felby (2016) destaca la importancia de la sostenibilidad en las actividades industriales, ya que como se ha visto a lo largo de la historia los recursos se han estado agotando. Con este panorama claro es evidente que los planes para el futuro necesitan ser modificados para afianzar el compromiso con el medio ambiente y la preservación de los recursos para las generaciones futuras. El principal objetivo del estudio propuesto por los autores es analizar métodos de producción de imágenes y el objetivo de ampliar el marco de estas imágenes (imágenes de futuro), incluyendo las dimensiones sostenibles. La metodología es establecer un trabajo

interdisciplinario, vinculando conceptos de diferentes disciplinas. Teniendo una base conceptual, el saber si será posible proponer una perspectiva sostenible sobre los métodos utilizados para producir imágenes. Luego, se presenta un estudio de caso para probar el nuevo marco de escenarios los cuales serán aplicados a la industria del biodiesel en Brasil, con el horizonte hasta 2030. Como resultado de la investigación de Dias et al. (2016) se construyeron 4 escenarios con la ayuda de personal experto e involucrados en la toma de decisiones políticas, en los cuales se analizan opciones que van desde la sostenibilidad para el sector, aspectos de inclusión social hasta acciones que significarían el colapso de la civilización.

Otro enfoque de estudio en la misma línea de creación de escenarios es el realizado por Saritas & Aylen (2010) en la combinación entre los escenarios y el *roadmapping* (hoja de ruta) en la construcción de estándares de producción limpia en la fabricación de metales, aprovechando el proyecto europeo CLEANPROD. El objetivo del proyecto fue desarrollar un conjunto de hojas de ruta para la investigación dirigida hacia la consecución de la sostenibilidad en las áreas de mecanizado, revestimiento y preparación de la superficie de las organizaciones productoras de metales. La óptica metodológica expuesta en el estudio propone el uso de escenarios y el *roadmapping* a través de: (i) el establecimiento de visiones para las hojas de ruta considerando futuros alternativos, lo que agrega una característica exploratoria al proceso; ii) vías alternativas para dichas rutas; iii) mejorar el poder explicativo de las hojas de ruta, y iv) probar la solidez del *roadmapping* frente a escenarios.

Cabe destacar que ambas metodologías poseen ventajas y desventajas, lo que hace más atractiva la necesidad de integrarlas y presentar un nuevo enfoque. Como lo mencionan Saritas & Aylen (2010) en su investigación:

La integración de los escenarios y la elaboración de la hoja de ruta es beneficiosa en un proceso de formulación de políticas y estrategias. Ambos métodos tienen propiedades deseables y son complementarios. En este sentido, el uso de escenarios en el proceso de hoja de ruta ayuda a superar algunas de las críticas dirigidas contra la elaboración de mapas de ruta como método de previsión. Con la introducción de escenarios, el proceso de hoja de ruta no sólo es normativo, sino que también se convierte en exploratorio al considerar un conjunto de futuros probables. La linealidad y el aislamiento de las hojas de ruta se eliminan con la aplicación de un proceso de planificación de escenarios creativo, interactivo y colaborativo (p. 1967).

Para el análisis de sostenibilidad bien sea en una organización o en la sociedad en general, se deben establecer una serie de indicadores que permitan hacerle trazabilidad a las decisiones que tomen respecto al tema. Dichos indicadores deben incluir las dimensiones económicas, ambientales y sociales (S. Scarpellini, Valero, Llera, & Aranda, 2013; Stoycheva et al., 2018), en donde participan unos actores responsables de dichos aspectos. Como alternativa para integrar a los actores de las principales áreas mencionadas anteriormente se emplean técnicas de decisiones multicriterio o análisis multicriterio, las cuales están ganando popularidad en la gestión sostenible (S. Scarpellini et al., 2013) ya que permite tener en cuenta una gran cantidad de datos, relaciones, objetivos y las preferencias de las partes interesadas en la situación a analizar (Stoycheva et al., 2018). Los análisis multicriterio cuantifican las decisiones, las cuales pueden ser usadas para comparar alternativas. Este tipo de comparaciones son importantes a la hora de analizar innovaciones sostenibles, ya que los criterios de sostenibilidad son complejos a la hora de cuantificar (Stoycheva et al., 2018).

Seguidamente, Scarpellini et al. (2013) presentaron un análisis simplificado de decisiones multicriterio basados en curvas de ahorro-inversión-empleo para analizar sectores abiertos a la sostenibilidad bajo las dimensiones económicas, sociales y ambientales, de esta manera, identificando cómo se priorizan las acciones. Del mismo modo Stoycheva et al., (2018) presentaron un marco conceptual que permitió evaluar la fabricación ecológica y mostrar dicha aplicación en el sector automotriz con el objeto de seleccionar alternativas limpias de fabricación. Los resultados que se obtuvieron fueron alternativas de materiales para la producción, los cuales pueden ser seleccionados cuantitativamente de acuerdo con los objetivos sostenibles de la organización; Watróbski (2016) desarrolló un bosquejo para la selección de un subconjunto de métodos de análisis de criterios múltiples que se adecúen a problemas particulares de logística ecológica. Para llevar a cabo el estudio el autor seleccionó una serie de problemas logísticos, los cuales abordó desde una revisión de la literatura validada con conocimiento de expertos.

2.2.4 Metodologías de modelado y simulación

En los últimos años se han evidenciado crecientes problemas ecológicos como producto de la contaminación ambiental, por lo que se ha visto la necesidad de promover a través de métodos eficaces, estrategias para reducir la contaminación (Tian, Govindan, & Zhu, 2014). Se han construido escenarios a través de métodos prospectivos y de simulación que recrean las condiciones ideales de los sistemas, generándose variaciones para la formulación de dichos escenarios. Uno de esos métodos de simulación es el Modelado Basado en Agentes (MBA) que analiza de manera minuciosa

el comportamiento de un agente y un conjunto de datos que permiten modelar sistemas complejos (Rai & Robinson, 2015).

Rai & Robinson (2015) diseñaron un modelo de adopción de tecnología basado en agentes, aplicado principalmente a la adopción de sistemas fotovoltaicos en hogares en Austin, Texas, entre el periodo de 2004-2013. Se buscó generar patrones temporales y espaciales observados de manera empírica con el objetivo de generar un insumo para mejorar la toma de decisiones en la planificación de servicios públicos; Schwarz & Ernst, (2009) presentaron un MBA de la difusión de tres innovaciones que permiten el ahorro de agua en el sur de Alemania. Los datos modelados correspondieron a una investigación empírica con un cuestionario realizado a 272 participantes. En el estudio se tomaron los hogares como los agentes que efectúan decisiones relacionadas con el uso de tecnologías para ahorrar agua. Para el modelo, sin embargo, un agente no representa un hogar en específico, sino que representa a un grupo de hogares con particularidades específicas en un kilómetro cuadrado. El estudio dio como resultado el diseño de cuatro escenarios posibles para la difusión de este tipo de tecnologías.

De igual modo, Desmarchelier, Djellal, & Gallouj (2013) plantearon un MBA teórico donde se investigó hasta qué punto las políticas fiscales medioambientales y las políticas de información al consumidor final puede fomentar la eco-innovación en el sector servicios. Como resultado de las simulaciones se evidenció que las políticas ambientales motivan a las empresas del sector servicios a generar innovaciones sostenibles para ofrecer a sus usuarios y mejorar sus procesos.

Por otro lado, se han realizado estudios donde se emplea la DS a la hora de simular y verificar la efectividad de las políticas en diferentes sectores sociales, entre ellos el de la política energética de Estados Unidos, como lo indica Naill (1992), quien realiza un modelo integrado de suministro de la demanda de energía de ese país, para el análisis de las políticas energéticas. El autor menciona que el tema del estudio del consumo de energía en los Estados Unidos ha sido y seguirá siendo un tema de interés por los niveles de contaminación que esto genera y por la importación de grandes cantidades de petróleo.

Asimismo, Kazemi & Hosseinzadeh (2016) plantearon en su investigación la planificación de la provisión de energía en Irán a través del uso de un modelo de DS, lo cual generó unas proyecciones de las tendencias de emisiones de GEI en el futuro bajo la implementación de una serie de políticas combinadas que incentivan la disminución de dichos gases; se analizaron escenarios de futuros posibles, los cuales son la respuesta a interrogantes que se plantean cuando se diseñan modelo de DS como, «qué pasa si...», donde dichas respuestas generan una lista de políticas relacionadas con la disminución de GEI. Este modelo se plantea entonces como una herramienta para que las

personas responsables de la toma de decisiones en las políticas puedan estimar las consecuencias que traigan consigo el consumo energético iraní, que permitan la disminución de GEI a largo plazo.

De igual manera, (Müller, Kaufmann-Hayoz, Schwaninger & Ulli-Beer 2013 and Timma, Bariss, Blumberga & Blumberga 2015) desarrollaron modelos de difusión de tecnologías ecológicas genéricos empleando DS que pueden ser adoptados por cualquier organización. Shih & Tseng (2014) diseñaron un modelo de DS para calcular la cantidad de ahorro de energía a través de un escenario de la promoción de una política energética sostenible, lo cual tiene en cuenta las energías renovables y las mejoras en la eficiencia energética; en el desarrollo y verificación del modelo diseñado se cuantificaron los beneficios durante los años 2010 y 2030. Ansari & Seifi (2013) diseñaron también un modelo de DS para analizar el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en la industria cementera iraní a través del diseño de unos escenarios donde se contemplaban diversas actividades de producción y exportación.

Según Shih & Tseng (2014) se han adoptado una serie de modelos energéticos de DS para la evaluación de escenarios y políticas de reducción de los niveles de CO₂, evaluando así también los impactos económicos. Los autores destacan que:

El enfoque de DS es adecuado para modelar ambientes dinámicos, como ecosistemas y actividades humanas, en una escala multi-dimensional con variables dependientes del tiempo. El modelo de DS se ha aplicado para la planificación estratégica de la energía y el análisis de políticas desde principios de los años setenta, comenzando con los conocidos modelos «Límites del Crecimiento». (p. 58).

Es así como en los últimos años se han evidenciado crecientes problemas ecológicos como producto de la contaminación ambiental, por lo que se ha visto la necesidad de promover a través de métodos eficaces, estrategias para reducir la contaminación (Tian et al., 2014), y conociendo los beneficios que se obtienen al implementar procesos de eco-innovación, se ha planteado la siguiente pregunta de investigación: *¿qué estrategias les permite a las organizaciones manufactureras fomentar la implementación de procesos de eco-innovación?*

Por lo tanto, el alcance de esta investigación se acota en las organizaciones manufactureras, entiéndase estas como empresas que transforman materias primas para ofrecer un producto terminado o semiterminado al mercado, generándose los siguientes objetivos que permitan responder la anterior pregunta de investigación.

2.3 Objetivo general

Analizar las dinámicas de eco-innovación a través de modelación y simulación computacional.

2.4 Objetivos específicos

- Identificar variables que intervienen en los procesos de eco-innovación
- Diseñar un modelo computacional que represente las dinámicas de eco-innovación
- Formular estrategias enfocadas en la implementación de procesos de eco-innovación
- Probar el comportamiento de estrategias de eco-innovación en ambiente simulado

3. Metodología

3.1 Selección de la metodología

De la revisión anterior se evidencia que se han empleado varias metodologías para abordar el tema principal de este estudio. Esta selección depende entonces del tipo de problema a estudiar. Se concluye que la DS es una buena opción a la hora de modelar problemas muy complejos. Sin embargo, a la hora de analizar estrategias de implementación de procesos de eco-innovación, hacia donde va encaminada la selección de la metodología, se evidencia que la DS se diferencia de otros métodos de análisis, en que la metodología identificada supone identificar relaciones de influencia entre variables de un sistema complejo con el objetivo de llevar a cabo una comparación entre la realidad y el comportamiento dinámico del modelo que simboliza el sistema en su conjunto. De igual manera, dicha metodología es apropiada para simular sistemas que abarquen relaciones no lineales que se generan en ambientes dinámicos que hacen que, emplear enfoque o métodos analíticos para resolver esas no linealidades no sean factibles (Poles, 2013). Por lo que, se considera adecuado escoger como metodología para evaluar estrategias la DS, ya que permite tener en cuenta variables, procesos dinámicos, políticas y escenarios enfocados a mejorar el rendimiento de una organización.

Al revisar las diferentes metodologías que se han establecido para analizar estrategias sostenibles en las organizaciones, se logra evidenciar que el análisis de escenarios es una metodología que ha tenido gran aceptación y uso. Sin embargo, resulta muy compleja, ya que estos escenarios deben ser validados por expertos (Vergara, Fontalvo, & Maza, 2010) y se pueden presentar contradicciones entre ellos (Godet, 2000). Aun así, la DS y la creación de escenarios son metodologías complementarias.

Los métodos multivariados aquí expuestos para estudiar el concepto de eco-innovación, permite a los investigadores interpretar y visualizar un conjunto de datos, en la mayoría de los casos grandes, para encontrar relaciones entre dichas variables o individuos, o entre ambos. Estas técnicas en su mayoría tienden a tener un carácter exploratorio y no tanto inferencial (Nieto, 2015). Estos métodos se enfocan principalmente en analizar variables y las relaciones entre ellas, al igual que la DS. Sin embargo, es necesario tener muestras muy grandes en algunos casos para disminuir el error

(Manzano, 2000). En algunos métodos como el análisis de regresión debe existir una linealidad entre variables (Aggarwal & Ranganathan, 2017; Sun & Park, 2017), lo que difiere de la DS. Igualmente, las observaciones de una muestra deben ser independientes y no se deben incluir valores extremos, ya que ello puede generar errores y los resultados pueden ser engañosos (Aggarwal & Ranganathan, 2017), mientras que en DS para realizar la validación de los modelos se emplean condiciones extremas para verificar la estructura de los mismos.

El objetivo de la MBA es el estudio de los componentes básicos del sistema a analizar. El proceso de conceptualización de la realidad es realizado sobre cada elemento de manera individual, mientras que la DS se centra en el sistema en conjunto, analizando las relaciones entre las variables observables (L. Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008). A grandes rasgos, se puede decir que la DS se emplea para modelar entidades homogéneas, por otro lado, la MBA se puede aplicar para analizar sistemas complejos que requieran la interacción entre individuos heterogéneos que soliciten intercambio de información.

Por otro lado, las metodologías de diseño aquí expuestas para abordar el concepto eco-innovación, no cumplen con el objetivo del estudio, debido a que dichos métodos se emplean para el diseño de productos ecológicos, no para realizar evaluaciones sobre estrategias al interior de las organizaciones.

Los modelos de DS son los más adecuados para el estudio de sistemas que implican interacciones entre factores físicos y humanos (Agarwal, Green, Grove, Evans, & Schweik, 2002). Igualmente, esta metodología es conveniente emplearla como soporte en la toma de decisiones en casos donde existe un desconocimiento del sistema, confusión y no haya una solución directa del mismo (Pidd, 1999) lo que permite una disminución de la incertidumbre que trae consigo los procesos de toma de decisiones.

Por otro lado, la simulación en DS permite analizar sistemas bajo situaciones en las cuales llevar a cabo experimentación física resulta ser complicada, poco factible, riesgosa, costosa, al ser necesario, en la mayoría de los casos, inversión en recursos humanos, económicos y tecnológicos. Además, la simulación de dichos sistemas complejos permite entender mejor su comportamiento; se puede incluso, incorporar nuevas variables o parámetros que ayuden a mejorar el sistema. Finalmente, la simulación permite realizar diversas pruebas y generar resultados en poco tiempo, manipular variables que puedan generar incertidumbre al investigador o al gerente de la organización, anticipándose, por medio de la simulación de escenarios a posibles eventos en la organización (Aguirre Ramírez & Ramírez Sossa, 2014).

3.2 Dinámica de sistemas

La DS se emplea para el modelado de políticas o estrategias para entender mejor la interacción entre sector industrial, el medio ambiente, las personas responsables de la toma de decisiones y la formulación de estrategias para el sector manufactura. La DS es una forma empleada para la modelación de sistemas en todas las áreas del conocimiento y entornos económicos y de negocio, entre ellas la gestión medioambiental (L. R. Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008). Esta metodología agrupa cada una de las áreas funcionales de una empresa como son la dirección, inversión, investigación, comercialización, personal, producción y contabilidad, reduciéndolas a una base común, de modo que cualquier actividad económica se reduce a un flujo, ya sea monetario, de pedidos, de materiales, de personal o de equipamiento (González & Múgica, 1998).

La DS reúne las relaciones causales y una variables que se pueden observar. Dichas relaciones se pueden expresar a través de ecuaciones algebraicas con la singularidad de valores que satisfacen estas ecuaciones, lo que genera la dinámica general del sistema. Las expresiones matemáticas pueden tener en cuenta variabilidades en el tiempo y en el espacio, es decir, ecuaciones diferenciales y diferenciales parciales, respectivamente. El diseño de estos modelos permite la abstracción de una realidad, lo cual hace mucho más fácil su comprensión y manipulación (L. R. Izquierdo et al., 2008). En definitiva, la simulación basada en DS permite observar los efectos que traería consigo la adopción de nueva estrategia o nueva forma organizativa en un sistema real.

La selección de DS para esta investigación se centró, principalmente, en la capacidad de la metodología de modelar sistemas con estructuras de realimentación complejas empleando la exposición visual que posteriormente se convierten en fórmulas matemáticas. Las estructuras de realimentación se adquieren de los flujos de materiales e información y de las decisiones que puedan tomar los gerentes a través de la implementación de determinadas estrategias establecidas por las variables del sistema de la presente investigación (Poles, 2013).

Para el desarrollo de esta propuesta se plantea el uso de dicha metodología que permitirá la evaluación de estrategias de implementación de procesos de eco innovación en cualquier organización. En la **Figura 1** se puede observar un resumen de los pasos a seguir a la hora de aplicar una metodología de esta técnica de modelado. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de ellos.



Figura 1. Proceso de modelado en DS
Fuente: tomado de (Rodas, 2015, p.5)

3.2.1 Identificación de variables y definición del problema

El proceso debe iniciar con definir y delimitar el sistema de acuerdo con las cuestiones que se definan y lo que se quiera lograr con este proceso. Por lo cual, se debe identificar muy bien el problema. Se inicia con la recopilación de información, recolección de datos y enlistar todas las variables que se consideren necesarias para analizar el sistema. Seguidamente, se identifican las variables clave (variables exógenas y endógenas) asociadas a los valores cuya variación, a lo largo del tiempo, se quiere estudiar y que ayuden a definir los límites del sistema. Una variable es una condición o decisión que puede influenciar en el comportamiento del proceso. Las variables seleccionadas fueron validadas y seleccionadas por personal experto en la temática de estudio, empleando una encuesta que se puede observar en el **Anexo A**.

La validación con los expertos se llevó a cabo empleando una escala de Likert, con el objetivo de que los expertos seleccionados, los cuales fueron identificados por la experiencia en temas relacionados con eco-innovación a través de una revisión de la literatura, clasificaran las variables según su nivel de importancia: no es importante, menos importante, importante, muy importante (ver Anexo A). Se elaboró y se envió el formulario de Google con la descripción del objetivo del proyecto y la importancia de su validación a 17 investigadores de universidades como: Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad de Zaragoza, Universidad EAFIT, Universidad de Ciencias Aplicadas de Augsburg, Universidad Politécnica de Valencia, National Taipei University, Universidad de Cantilla la Mancha, Universidad de Girona, Universidad de País Vasco, Universitat de Valencia y Riga Technical University.

3.2.2 Diseño del diagrama causal

En la metodología de DS los diagramas causales juegan dos papeles importantes. Primero, en la fase del desarrollo del modelo sirven como bocetos preliminares de hipótesis causales y como segundo, proporcionan una visión general y simplificada del modelo. Las flechas o enlaces del diagrama simbolizan las relaciones entre las variables. La dirección de los enlaces muestra la dirección de la causa-efecto. Los signos, positivo y negativo, demuestran el signo del efecto; cuando el signo es positivo las variables cambian en la misma dirección, de lo contrario cambia en la dirección opuesta. Los modos de realimentación son ciclos de realimentación negativa o también llamado ciclo de balance o ciclo de realimentación positiva o ciclos de refuerzo. Los ciclos de balance exponen un comportamiento de la búsqueda de objetivos, que después de una perturbación del sistema busca una situación de equilibrio. En un ciclo de refuerzo una perturbación inicial orienta hacia un cambio adicional, lo que propone la presencia de un equilibrio inestable (Georgiadis, 2013; Vlachos, Georgiadis, & Iakovou, 2007).

3.2.3 Formulación del modelo

Los modelos se diseñan a través de la abstracción de la realidad, con el fin de ayudar a comprender determinados aspectos de un sistema (L. R. Izquierdo et al., 2008), ello comienza con la observación del sistema que se va a estudiar, lo cual incluye muchas veces la recolección de datos necesarios para el análisis. Se establecen las condiciones de simulación, así como las relaciones causales que existan entre las variables seleccionadas a través de un diagrama causal. Dichos diagramas muestran los ciclos de realimentación que presentará el sistema y de igual manera los retardos que se deben considerar. Posterior a eso, se continúa con el diseño del modelo. Un modelo será útil en la medida en que se logre captar los detalles más relevantes del sistema de estudio y genere conocimiento que se puedan replicar a otras situaciones.

3.2.4 Diseño del modelo matemático

La notación en DS se representa por medio de los ciclos de realimentación y la existencia de los niveles y flujos, los conceptos centrales de la teoría de DS para la representación de las variables de análisis. Los sistemas empresariales y sociales poseen una serie de variables que pueden verse como niveles que acumulan recursos a lo largo del tiempo y que, de acuerdo con unas entradas y salidas, cambian. Estas estructuras se pueden capturar para crear un modelo de simulación de DS (Poles, 2013).

Los modelos cualitativos en DS involucran diferentes tipos de variables. Los rectángulos representan las variables de nivel que acumulan información; las entradas a estos niveles se simbolizan mediante tuberías y válvulas las cuales representan las variables de flujo (que suman en el modelo matemático) y las salidas restan de la acción anterior.

Las ecuaciones de nivel se determinan como las integrales de tiempo de los flujos netos. Los flujos se definen mediante las funciones de tiempo de las existencias y los parámetros del sistema. Este diagrama de flujos y niveles se traduce como un sistema de ecuaciones diferenciales que, debido a su complejidad, se resuelven por medio de simulación. Hoy día la simulación se realiza mediante programas de simulación gráfica como Powersim, Vensim, Stella, Ithink, entre otros. Esta sección proporciona entonces las ecuaciones matemáticas desarrolladas para mantener el análisis lo más genérico posible. Las ecuaciones se deducen o establecen por la estructura del modelo que se representa con el diagrama de niveles y flujos, lo que incluye también las variables auxiliares y constantes (llamadas parámetros) que ayudan a aclarar el modelo.

En los modelos de DS, las variables de niveles y flujos representan el modelo matemático de ecuaciones diferenciales; los eventos planteados pueden suceder en cualquier momento y el cambio puede ocurrir continuamente. La denotación matemática general entonces, de los niveles y flujos viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$N(t) = \int_0^t [F_{entrada}(t) - F_{salida}(t)] dt + N(t_0) \quad (1)$$

$$F_{entrada} = f(N(t), E(t), P); \quad (2)$$

$$F_{salida} = g(N(t), E(t), P) \quad (3)$$

Donde, E es cualquier variable exógena y P parámetros del sistema (Georgiadis & Michaloudis, 2012).

3.2.5 Validación del modelo

En esta fase se expone el modelo a pruebas y análisis para analizar su validez y calidad. De acuerdo con dichas pruebas, el modelo requerirá o no realizar ajustes o cambios para parecerse al sistema real estudiado. Los análisis pueden ser variados y abarcan la comprobación de la consistencia lógica de las hipótesis. La validación del modelo se realiza en dos niveles:

- *Prueba de estructura*: el principal criterio de validación de los modelos de DS es la validez de la estructura, que es el conjunto de relaciones utilizadas en el modelo, en comparación

con los procesos reales. Para descubrir fallas en la estructura existen ciertas técnicas y pruebas. Entre las que se encuentran las pruebas de estructura directa e indirecta. Las pruebas de estructura directa conllevan una evaluación comparativa de cada ecuación del modelo y el sistema real (o en la literatura analizada) o por medio del criterio de expertos. Las pruebas de estructura indirecta desarrollan un proceso subjetivo y cualitativo que compara las ecuaciones con las relaciones reales (González-Busto, 1998; Vlachos et al., 2007).

- *Prueba del comportamiento orientada a la estructura:* las pruebas de estructura indirecta son métodos cuantitativos para probar la validez de la estructura del modelo. En estas pruebas existen dos tipos de pruebas, el análisis de sensibilidad y pruebas de condiciones extremas. Las pruebas de condiciones extremas suponen la asignación de valores extremos a los parámetros del modelo comparándolos con los valores extremos que tomaría el sistema real, si el modelo posee algún defecto estructural en estas condiciones, se pueden evidenciar en este tipo de pruebas. Las pruebas de sensibilidad constan en determinar los parámetros con los que el modelo puede llevar a ser sensible y si dichas sensibilidades tendrían alguna implicación en el sistema real. Si ello ocurre, esto se traduce en fallas en las ecuaciones del modelo (Vlachos et al., 2007).

3.2.6 Diseño de estrategias

En esta fase se proponen estrategias que se desean evaluar con el modelo propuesto, se establecen las posibles combinaciones, las probables y las poco probables. Por ello se requiere comprobar qué tan exacto es el modelo y qué tan sensible ante los cambios que se establecerán, por medio del diseño de estrategias de implementación de procesos de eco-innovación. En la siguiente fase se validan dichas estrategias. Es recomendable validar el modelo bajo condiciones extremas, tanto en los límites superiores como inferiores, ello generará una curva de aprendizaje al respecto del sistema real.

En la **Figura 2** se puede observar el proceso metodológico que se llevará a cabo para el desarrollo del proyecto de investigación, que incluye cada objetivo o fase a alcanzar, así como sus actividades y sus respectivas herramientas de análisis.

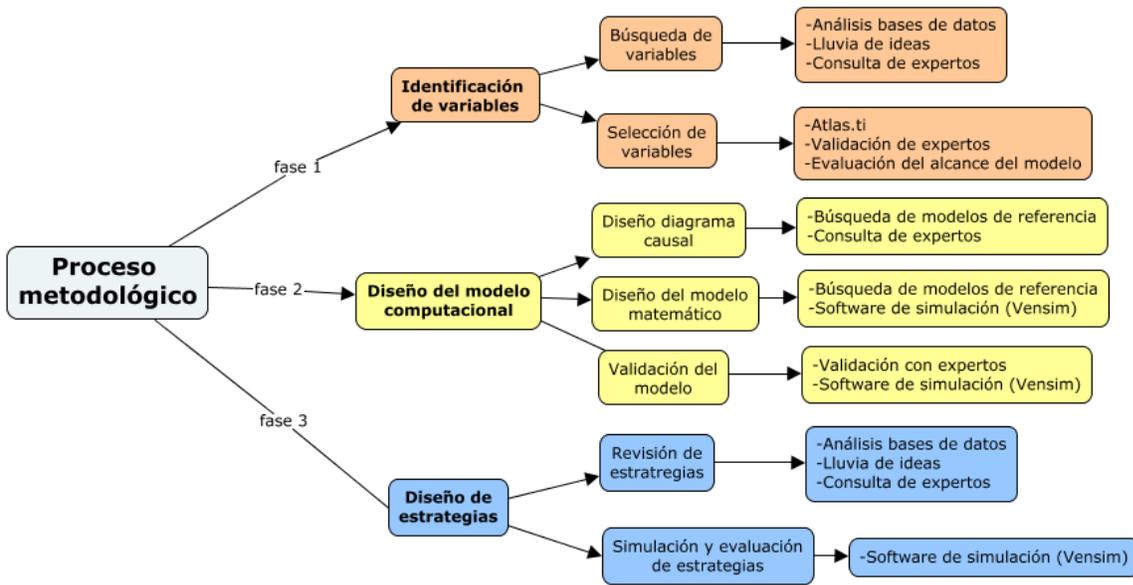


Figura 2. Proceso metodológico
Fuente: elaboración propia

4.Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la construcción del modelo y evaluación de estrategias seleccionadas. Inicialmente se identificaron las variables a partir de una revisión de la literatura; posteriormente, se seleccionaron las variables que se emplearon para la construcción del modelo del sistema a través de la validación con personal experto; luego se construyó el modelo y se calibró por medio de la validación con expertos. Por último, se muestran los resultados del modelo cuando se evalúan las estrategias seleccionadas.

4.1 Identificación de variables

Uno de los retos fundamentales de las ciudades es combatir los problemas ambientales y alcanzar así un desarrollo sostenible, por ello es importante reducir los impactos ambientales de múltiples sectores. Uno de ellos es el de la actividad industrial, teniendo en cuenta que la transición hacia ciudades sostenibles requiere innovaciones sustanciales (Freire, 2018). Esto necesita un enfoque mucho más amplio, modificación sistemática en los procesos de producción de las industrias, ya que la introducción de eco-innovaciones trae consigo mejora en los productos, procesos y servicios (Ociepa & Pachura, 2017). Por lo que es necesario que las organizaciones del sector manufactura adopten nuevas prácticas sostenibles. Es allí donde toma importancia la implementación de procesos ecológicos para ofrecer productos y servicios que generen menos impacto negativo al medio ambiente.

Para la implementación de procesos de eco-innovación en una industria, existen una serie de factores determinantes que promueven o evitan la adopción de dichos procesos (Del Río, Peñasco, & Romero, 2016). Realizando una revisión de la literatura sobre estudios de los impulsores que fomentan los procesos sostenibles en una organización, se evidencian que existen razones tanto endógenas como exógenas que afectan su implementación (Klewitz, Zeyen, & Hansen, 2012).

En el proceso de identificación de variables se tuvo en cuenta para su selección, estudios econométricos empíricos de autores que han mostrado el interés en identificar los distintos factores y obstáculos de las eco-innovaciones en diferentes sectores y regiones, principalmente en países europeos (Ociepa & Pachura, 2017), donde las eco-innovaciones tienen mayor aplicación. Véase **Anexo B**.

Se emplearon palabras clave para realizar la búsqueda en *Scopus* tales como se muestra en la siguiente ecuación empleada para la selección de la bibliografía. *TITLE-ABS-KEY(("eco-innovation" OR "environmental innovation") AND (drivers OR determinants))*. Del resultado de la ecuación de búsqueda se seleccionaron 26 artículos de autores, que, en sus estudios empíricos, priorizaban los determinantes de la eco-innovación. La **Figura 3** muestra la red de citación entre autores, de acuerdo con los resultados de la ecuación de búsqueda en la base de datos *Scopus*, y muestra la relevancia de cada uno de ellos, identificando actores clave al momento de la selección de las variables, con el propósito de hacer la validación de las variables seleccionadas para el modelo con ellos. En la **Figura 4** se observan la clasificación de las variables seleccionadas, entre exógenas y endógenas.

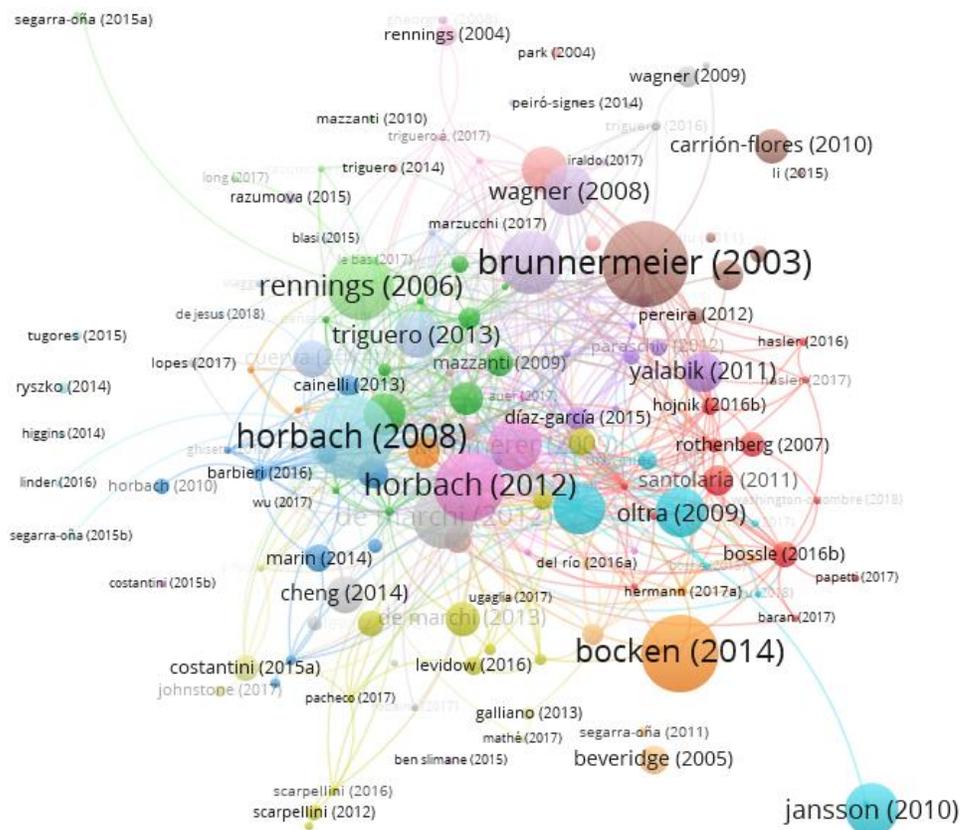


Figura 3. Redes de citación entre autores
Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de la literatura

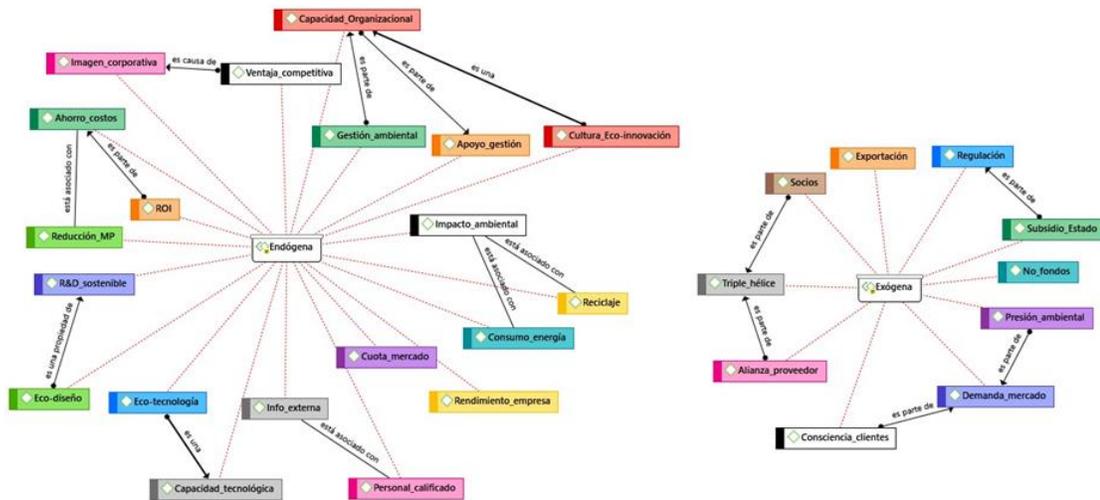


Figura 4. Variables exógenas y endógenas
 Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de la literatura

4.1.1 Selección de variables

Para realizar la selección de las variables con las que se construyó el modelo de simulación fue necesaria su validación con personas expertas en temas de sostenibilidad, que, desde su experiencia, aportaron para darle confiabilidad y validez al modelo que se construyó para evaluar estrategias que permitan la implementación de procesos de eco-innovación en organizaciones del sector manufactura. De la solución del formulario enviado a los expertos se obtuvieron seis (6) respuestas. A continuación, se realiza un análisis de las respuestas de los expertos.

De acuerdo con nivel de importancia de las respuestas obtenidas por parte de los expertos, las variables que son consideradas *muy importantes* para tener en cuenta a la hora de implementar procesos de eco-innovación en organizaciones del sector manufactura son: el ahorro de energía con un 83,3%; los impactos ambientales, el consumo de energía y las regulaciones estatales con un 66,7%; y la eficiencia de los equipos, consumo de energía y las emisiones de gases contaminantes con un 50% de coincidencia entre los expertos. Es decir, que del total de las variables el 50% son consideradas muy importantes.

Por otro lado, las variables consideradas *importantes* por parte de los autores son: el costo de inversión en nuevas tecnologías, la imagen corporativa y la cantidad de material recuperado del proceso de producción (reciclaje) con un 66,7%; y costo de materia prima, la eficiencia de los equipos y el consumo de energía con un 50% de importancia. Es decir, que del total de las variables el 42,9% son consideradas importantes. Así bien, en términos generales, de las 14 variables validadas

el 71,4% de variables son consideradas importantes para tener en cuenta en el diseño del modelo de simulación.

Como resultado de la validación de las variables con los expertos se evidencia que la integración de los aspectos e innovaciones relacionadas con la sostenibilidad puede ser beneficioso para las organizaciones ya que se pueden reducir los costos (Belin, Horbach, & Oltra, 2011; Klewitz et al., 2012; Ryszko, 2015) (por ejemplo, a través de un sistema de gestión de energía), lo que se traduce en disminución de consumos de energía (Hojnik, Ruzzier, & Manolova, 2017; Klewitz et al., 2012; Sabina Scarpellini, Valero, & Portillo, 2016; Segarra, Peiró, & Cervelló, 2015; Tsai & Liao, 2017). Para Horbach (2008), las empresas no pueden reconocer los potenciales ahorros en costos de las innovaciones medioambientales, por ejemplo, el ahorro de materia prima (Cai & Li, 2018; Kijek & Kasztelan, 2013; Portillo-tarragona, Scarpellini, Moneva, Valero, & Aranda-usón, 2018; Triguero, Moreno, & Davia, 2013) y las actividades de reciclaje son considerados efectos positivos de la implementación de eco-innovaciones (Kijek & Kasztelan, 2013).

Otra variables que predominan en los diversos estudios son las regulaciones ambientales, tanto las existentes como las futuras (Belin et al., 2011; Kijek & Kasztelan, 2013). Es decir, el diseño de políticas ambientales adoptadas por los gobiernos para la protección del medio ambiente y lograr un desarrollo sostenible (Tsai & Liao, 2017). Estas regulaciones en algunos casos suelen ser un inconveniente para las organizaciones tecnológicamente menos avanzadas, ya que se incurren en un aumento de los costos para cumplir los requisitos. Sin embargo, para otras empresas, es una motivación debido a los altos impuestos que deben pagar por los niveles de contaminación (Kijek & Kasztelan, 2013). Investigaciones empíricas como las de Bartoszczuk (2015); Freire (2018); Rashid et al. (2015); Ryszko (2015); Valero, Scarpellini, Garcés & Rivera (2017) demuestran que las regulaciones ambientales (tales como: cargos por emisiones, permisos, estándares, entre otros) son un motor de la innovación ecológica, ya que la regulación puede «forzar» a las empresas a realizar innovaciones económicamente benignas (Brunnermeier & Cohen, 2003; Horbach, 2008), y por consiguiente, generen menos impacto negativo al ambiente.

Finalmente, la eco-innovación se reconoce, como cualquier tipo de innovación, como la búsqueda de un beneficio, en este caso de un beneficio ambiental y la generación de eficiencia ecológica (Sabina Scarpellini et al., 2016). Por lo tanto, la eco-innovación es considerada actualmente una oportunidad para que la empresa pueda conseguir o mantener su ventaja competitiva (Cai & Li, 2018; Freire, 2018; Hojnik et al., 2017; Ociepa & Pachura, 2017; Pacheco, ten Caten, et al., 2017; Tsai & Liao, 2017; Valero et al., 2017) al tiempo que mejora su desempeño ambiental (Cai & Li, 2018; Dhull & Narwal, 2016; Horbach, 2008; Klewitz et al., 2012; Segarra et al., 2015) y

mejora su imagen corporativa (Borghesi, Cainelli, & Mazzanti, 2012; Ryszko, 2015; Triguero et al., 2013).

En la **Tabla 2** se observan las variables de estado y los parámetros que se emplearon para el diseño del modelo, se muestran las variables seleccionadas por el personal experto. Sin embargo, algunas fueron excluidas teniendo en cuenta la complejidad para simularlas y el alcance de la presente investigación.

Tabla 2. Definición de las variables del modelo

Variable	Descripción	Tipo de variable
Equipos tradicionales	Equipos tradicionales de la empresa	Endógena
Compra de equipos	Adquisición anual de equipos tradicionales	Endógena
Obsolescencia	Reducción de la vida útil de los equipos tradicionales debido al avance tecnológico	Endógena
Tiempo de depreciación	Desgaste y pérdida de valor de los equipos tradicionales con el paso del tiempo	Endógena
Fracción inicial de equipos	Constante como valor inicial de los equipos tradicionales	Endógena
Reposición de equipos	Suma de la obsolescencia de los equipos tradicionales y ecológico, que determina el atraso tecnológico de la empresa, el cual es un insumo para la inversión en nuevos equipos	Endógena
Consumo de energía	Gasto total de energía de los equipos tradicionales	Endógena
Potencia	Potencia eléctrica de los equipos tradicionales la cual depende del consumo de energía y del voltaje	Endógena
Tiempo de utilización	Tiempo diario de utilización de los equipos tradicionales	Endógena
Costo consumo energía	Costo total del consumo de energía de los equipos tradicionales	Exógena
Precio kW/h	Precio del mercado del kW/h	Exógena
Conversión	Velocidad de adopción de tecnología ecológica, es decir, número de equipos ecológicos por unidad de tiempo	Endógena
Fracción de conversión	Determina cuántos de los posibles equipos tradicionales pueden convertirse a equipos ecológicos en cualquier momento	Endógena
Capacidad tradicional a nueva	Probabilidad de adopción de nueva tecnología dado un contacto de los equipos tradicionales con equipos ecológicos	Endógena
Contacto capacidad tradicional	Tasa total según en la cual se producen los contactos causados por el conjunto de equipos tradicionales con equipos ecológicos	Endógena
Tasa de contacto	Coficiente de contacto de las empresas con otras organizaciones que implementan procesos ecológicos	Endógena
Tasa de equivalencia	Número de equipos necesarios para cumplir la demanda	Endógena
Equipos demandados	Equipos demandados por parte de la empresa	Endógena
Fracción de capacidad	Relación entre la demanda y los equipos ecológicos necesarios para la producción de unidades, con el propósito de satisfacer las necesidades de los clientes	Endógena
Equipos ECO	Equipos ecológicos de la empresa	Endógena
Compra de equipos ECO	Adquisición anual de equipos ecológicos	Endógena
Obsolescencia ECO	Reducción de la vida útil de los equipos ecológicos debido al avance tecnológico	Endógena
Tiempo depreciación ECO	Desgaste y pérdida de valor de los equipos ecológicos con el paso del tiempo	Endógena
Consumo energía ECO	Gasto total de energía de los equipos ecológicos	Endógena
Tiempo de utilización ECO	Tiempo diario de utilización de los equipos ecológicos	Endógena
Potencia ECO	Potencia eléctrica de los equipos ecológicos la cual depende del consumo de energía y del voltaje	Endógena
Costo consumo ECO	Costo total del consumo de energía de los equipos ecológicos	Endógena
Costo operación	Gastos relacionados con la operación de todos los equipos tradicionales	Endógena
Costo de operación/equipo	Gastos relacionados con la operación de los equipos tradicionales de manera individual	Endógena
Costo mtto	Porcentaje del costo de operación que debe tenerse en cuenta para el funcionamiento óptimo de los equipos tradicionales (costo de mantenimiento)	Endógena
Costo MO tradicional	Costo mensual de la mano de obra tradicional de la empresa	Endógena
Costo empleados/año	Costo anual de la mano de obra tradicional de la empresa	Endógena
Costos tradicionales	Suma de todos los costos de la empresa	Endógena
Costo de adquisición	Costo anual de la adquisición de materia prima	Endógena
Costo unitario adquisición	Costo unitario de adquisición de materia prima	Endógena
Costo inventario	Costo anual de almacenamiento de la materia prima	Endógena
Costo unitario inventario	Costo unitario de almacenamiento de la materia prima	Endógena
Costos totales	Sumatoria de los costos tradicionales y ecológicos de la empresa	Endógena
Costo operación ECO	Gastos relacionados con la operación de todos los equipos ecológicos	Endógena
Costo operación/Equipos ECO	Gastos relacionados con la operación de los equipos tradicionales de manera individual	Endógena
Costo mtto ECO	Porcentaje del costo de operación que debe tenerse en cuenta para el funcionamiento óptimo de los equipos ecológicos (costo de mantenimiento)	Endógena
Costo MO ECO	Costo mensual de la mano de obra con capacitación en asunto sostenibles de la empresa	Endógena
Costo empleados ECO	Costo anual de la mano de obra con capacitación en asunto ecológicos de la empresa	Endógena
Costos ECO	Suma de todos los costos de la empresa implementando procesos ecológicos	Endógena
Empleados	Número total de empleados disponibles en la empresa	Endógena
Contratación	Selección y contratación de personal para la empresa	Endógena

Requerimiento de personal	Personal con conocimientos básicos necesario para ser contratado en la empresa	Endógena
Personas/equipos	Personas necesarias para manipular equipos tradicionales	Endógena
Capacidad personal	Empleados necesarios para la manipulación de equipos en la empresa	Endógena
Capacidad instalada	Potencial de producción de la empresa dependiente de los equipos tradicionales	Endógena
Terminación de contrato	Terminación anual de contratos de los empleados	Endógena
Tasa TCE	Coficiente que expresa la terminación de contratos de los empleados anualmente	Endógena
Capacidad instalada ECO	Potencial de producción de la empresa dependiente de los equipos ecológicos	Endógena
Capacidad personal ECO	Empleados necesarios con conocimientos en asuntos de sostenibilidad para la manipulación de equipos ecológicos en la empresa	Endógena
Personas/Equipos ECO	Personas necesarias para manipular equipos ecológicos	Endógena
Capacitación	Proceso de entrenamiento del personal en asuntos ecológicos	Endógena
Tiempo de capacitación	Tiempo requerido para el entrenamiento del personal en asuntos ecológicos	Endógena
Requerimiento personal ECO	Personal con conocimientos ecológicos necesario para ser contratado en la empresa	Endógena
Empleados experimentados	Empleados entrenados en asuntos ecológicos	Endógena
Tasa de TC	Coficiente que expresa la terminación de contratos de los empleados experimentados anualmente	Endógena
Tasa de adquisición	Coficiente que expresa la relación entre la materia prima adquirida anualmente	Endógena
Adquisición	Cantidad de materia prima adquirida para el proceso de producción	Endógena
Uso de materia prima	Transformación de la materia prima en unidades de producción	Endógena
Inventario MP	Inventario de materia prima disponible para la fabricación de unidades de producción	Endógena
Tasa MP	Relación que existe entre las unidades fabricadas con la materia prima disponible	Endógena
Desechos	Cantidad de material generado en el proceso de producción, el cual es recuperado y sumado al inventario de materia prima.	Endógena
Tasa de Reciclaje	Coficiente que expresa la relación entre la materia prima recuperada de las unidades con defectos de producción	Endógena
Producción	Unidades mínimas producidas teniendo en cuenta la capacidad instalada de la empresa (incluye personal y equipos disponibles)	Endógena
Inventario de productos	Unidades de producción en inventario	Endógena
Ventas	Unidades de producción adquiridas por los clientes de la empresa	Endógena
Demanda	Exigencia del mercado de las unidades de producción de la empresa	Exógena
Crecimiento demanda	Relación entre las unidades de producción demandadas anualmente	Exógena
Tasa de crecimiento demanda	Razón de crecimiento anual de la demanda	Exógena
Tasa de producción	Coficiente que expresa la relación entre las unidades de producción generadas por un equipo anualmente	Endógena
Ahorro de energía	Representada por la transición de equipos tradicionales a equipos ecológicos	Endógena
Impactos ambientales	Efectos negativos que produce la actividad industrial en el medio ambiente	Excluida
Regulaciones estatales	Normas o leyes del Estado para controlar los impactos negativos al medio ambiente	Excluida
Eficiencia de equipos	Analizada en la tasa de producción tradicional y la tasa de producción ECO, como el número de unidades producidas	Endógena
Emisiones de gases contaminantes	GEI emitidos por la actividad industrial de la empresa	Excluida
Imagen corporativa	Percepción que tienen los clientes de la empresa (positiva o negativa)	Excluida

Fuente: elaboración propia

4.2 Diseño del modelo computacional

4.2.1 Diseño de diagrama causal

En esta fase se realizó la construcción de una hipótesis, con la cual se pretende entender las relaciones causales entre las variables más relevantes que influyen en el proceso de implementación de eco-innovaciones en organizaciones del sector manufactura. La **Figura 5** muestra las relaciones causales identificadas para el modelo de producción. En la misma se aprecian cinco bloques que se establecen como las variables macro del modelo. Bloque Financiero, de Materia Prima, Producción, Equipos y Personal.

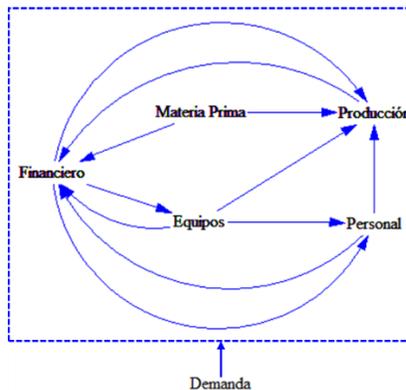


Figura 5. Esquema general del modelo de simulación
Fuente: elaboración propia

Bloque de producción: en la dinámica del diagrama causal de la **Figura 6** se observan cuatro ciclos de refuerzo y siete ciclos de balance. El ciclo R1 (proceso de reciclaje) representa la dinámica del proceso de reciclaje, que a más actividades de producción se generan mayores desechos que pueden ser reutilizados y agregados nuevamente al inventario de materia prima, estas actividades se consideran como acciones positivas a la implementación de eco-innovaciones (Kijek & Kasztelan, 2013).

En la **Figura 6** se puede observar, de igual manera el ciclo B1 (uso de materia prima), el cual presenta el proceso del uso de materia prima, que a mayor producción se genera disminución en el inventario de materia prima disponible, pero de igual forma, a mayor inventario de materia prima mayores unidades de producto se pueden generadas. Seguidamente, en el ciclo B2 (satisfacción de la demanda) indica que, a mayor producción en la empresa, aumenta el inventario de productos satisfaciendo la demanda de los clientes, aumentando la capacidad instalada (más equipos y mano de obra). Por otro lado, el ciclo B3 (productos en el mercado) muestra que a mayor inventario de productos (productos listos para el consumo) mayores son las ventas y este proceso de venta también disminuye la cantidad de productos a comercializar, por lo cual es necesario producir más unidades.

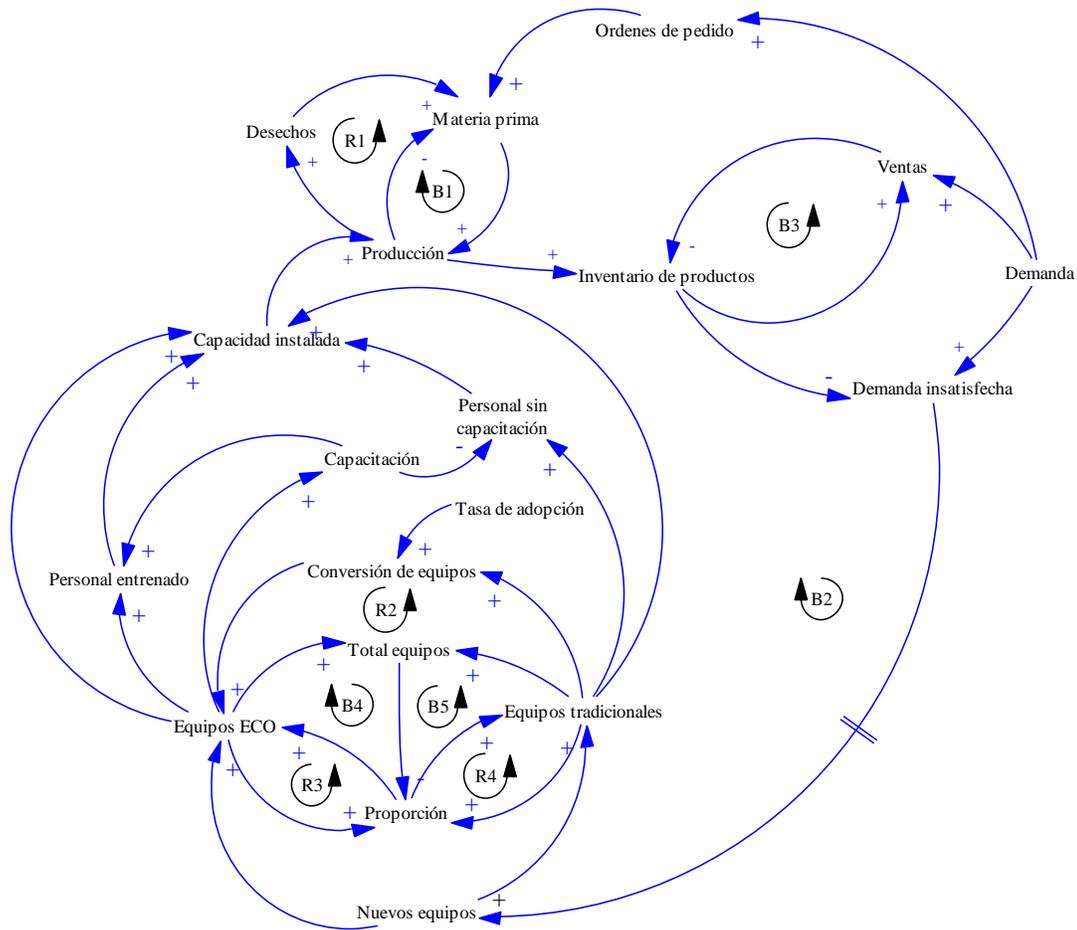


Figura 6. Diagrama causal del sistema de producción
Fuente: elaboración propia

Bloque de equipos: luego, en la misma figura se observa el ciclo R2 (actualización tecnológica), el cual representa la transición de equipos tradicionales a equipos ecológicos, afectada por una tasa de adopción tecnológica. Seguidamente, en el ciclo R3 y R4 (proporción de conversión) muestra la velocidad de conversión de equipos tradicionales a ecológicos. En la misma figura se evidencia el ciclo de balance B4 (más equipos ECO) este indica que a mayor cantidad de equipos totales (sumatoria de equipos tradicionales y equipos ECO) menor es la proporción de conversión de equipos, lo que evidencia la existencia de más equipos ecológicos. Por el contrario, en el ciclo B5 (menos equipos tradicionales) muestra que a menor proporción de conversión mayores son los números de equipos tradicionales. cabe destacar que los equipos tradicionales tienen un consumo de energía mayor que los equipos con mejor tecnología (equipos ECO), lo cual se traduce en la disminución de consumo de energía y por ende de costos totales (Hojnik et al., 2017; Klewitz et al.,

2012; Sabina Scarpellini et al., 2016; Segarra et al., 2015; Tsai & Liao, 2017), por lo que es necesaria la inversión en nueva tecnología

Por otra parte, el *bloque del personal* muestra la dinámica de la capacitación del personal que ingresa a la empresa, que a medida que se contrata personal sin conocimientos en asuntos de sostenibilidad, mayores serán los procesos de capacitación, por lo que esta última acción disminuye el personal sin entrenamientos como producto de la adquisición de equipos ecológicos. Teniendo en cuenta que para el proceso de producción normal de las empresas que manufacturan materias primas se requiere la contratación de personal con ciertas habilidades y capacidades, que, si bien se pueden contratar con ellas, en ocasiones es necesario capacitar al interior de la compañía; esa capacitación es necesaria para la manipulación de equipos y otras actividades de procesos sostenibles (Rashid et al., 2015), la cual se considera como parte de la capacidad instalada de la compañía. Investigaciones muestran el papel que juega el personal que se contrata en la organización en los procesos de eco-innovación (Portillo-tarragona et al., 2018) dado que para la manipulación de nuevos equipos es necesaria la contratación de personal con ciertas capacidades para operarla (Kijek & Kasztelan, 2013).

Finalmente, para el *bloque financiero*, se tiene en cuenta que la variable de costos se ve afectada por la mano de obra que se contrata, tanto con capacitación como sin capacitación; la adquisición de materias primas y la adquisición y costos de operación de los equipos con los que cuenta la empresa, tales como: consumo de energía, ya que entre más aumenta la demanda del mercado, aumenta el consumo de energía y por ende los costos de operación (Ryszko, 2015), teniendo en cuenta que son crecientes los consumidores que buscan alternativas respetuosas con el medio ambiente (Hojnik et al., 2017).

4.3 Diagrama de flujos y niveles

Con el modelo de simulación se busca explicar el comportamiento de los procesos sostenibles al interior de una organización. El análisis del sistema se llevó a cabo por medio de un modelo genérico, el cual cuenta con 84 variables, donde siete de ellas son de nivel (Inventario MP, Equipos tradicionales, Equipos ECO, demanda, inventario de productos, empleados y empleados experimentados) y 15 son variables de flujo. Está dividido por secciones, tales como: inventarios, producción y ventas, costos, equipos y empleados. El modelo fue construido en Vensim, un paquete de software de simulación. Para este análisis se usó un tiempo final de simulación de 20 años, analizando las simulaciones en periodos de 12 meses, ya que normalmente las organizaciones

realizan planes de inversión en tecnología anualmente Se empleó el método de integración Runge-Kutta de orden cuatro con un paso de integración de 0.125.

En el **Anexo C** se observa el diagrama de niveles y flujos del modelo propuesto, el cual lo conforman los niveles que se describen de manera independiente a continuación:

En el bloque de Equipos se cuentan con dos variables de nivel, la variable de equipos tradicionales y equipos eco-innovación. El nivel de *equipos tradicionales* acumula los equipos tradicionales que posee la organización o que adquieran y este disminuye o aumenta a medida que pasa el tiempo, el cual varía de acuerdo con el flujo de compra de equipos (Rydzak & Chlebus, 2007). Se espera que este disminuya, ya que se empezará a realizar mayores inversiones en equipos más eficientes. Entre más equipos se adquieran o existan mayor va a ser el número de equipos obsoletos. Un comportamiento similar ocurre con los *equipos ECO*, que son activos más eficientes ambiental y energéticamente, este nivel aumenta en la medida de que crece la inversión, la cual se espera en este caso ser mayor que la de equipos tradicionales. Para conseguir esto, el nivel de conversión tiene como objetivo hacer que la organización adquieran más equipos ecológicos y disminuir la compra de equipos con tecnología tradicional como se evidencia en la **Figura 7**.

En la **Tabla 3** se observan el sistema de ecuaciones del submodelo de los equipos con sus respectivas variables, relaciones y unidades.

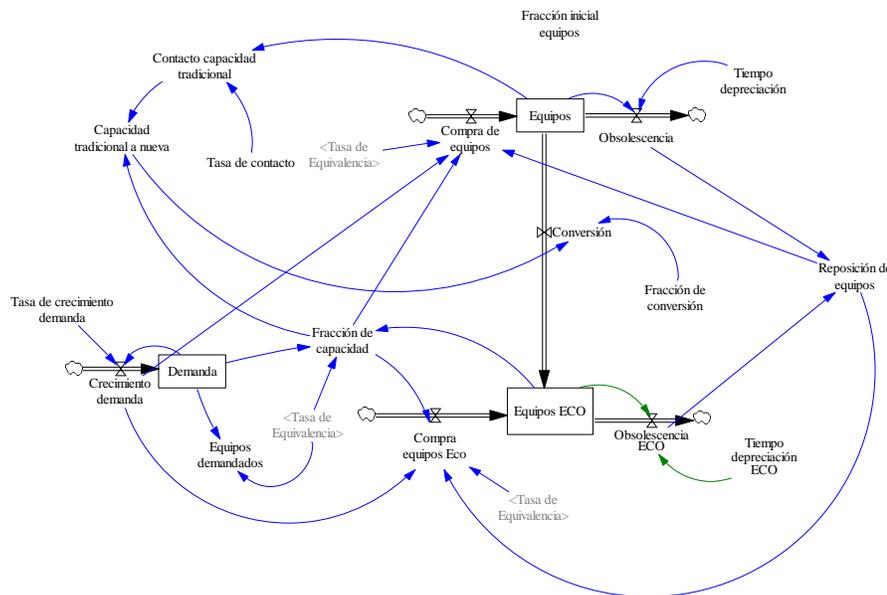


Figura 7. Submodelo equipos
Fuente: elaboración propia basado en (Rydzak & Chlebus, 2007)

Tabla 3. Sistema de ecuaciones submodelo equipos

Ítem	Variable	Fórmula	Unidad
1	Equipos tradicionales	= (Compra de equipos – Conversión – Obsolescencia)	Equipos
2	Compra de equipos	= (1 - Fracción de capacidad) * (Reposición de equipos + Crecimiento demanda / Tasa de equivalencia)	Equipos/Year
3	Obsolescencia	= Equipos tradicionales / Tiempo depreciación	Equipos/Year

4	Tiempo de depreciación	=10	Year
5	Fracción inicial de equipos	=0.05	Equipos/Unidades
6	Reposición de equipos	=Obsolescencia + Obsolescencia ECO	Equipos/Year
7	Consumo de energía	=(Potencia * Equipos tradicionales) * Tiempo de utilización	Hour * kW/Year
8	Potencia	=200	kW/equipos
9	Tiempo de utilización	=10	Hour/Year
10	Costo consumo energía	=Consumo energía * "Precio kW/h"	\$/Year
11	Precio kW/h	=543	\$(kW*hour)
12	Conversión	=MAX (0, Capacidad tradicional a nueva * Fracción de conversión)	Equipos/Year
13	Fracción de conversión	=0.15	Equipos/contacto
14	Capacidad tradicional a nueva	=Contacto capacidad tradicional * Imagen corporativa	Contacto/Year
15	Contacto capacidad tradicional	=Equipos tradicionales * Tasa de contacto	Contacto/Year
16	Tasa de contacto	=70	Contacto/equipos/Year
17	Tasa de equivalencia	=100	Unidades/equipos
18	Equipos demandados	=Demanda / Tasa de equivalencia	Equipos
19	Fracción de capacidad	= "Equipos ECO" / (Demanda / Tasa de equivalencia)	1
20	Equipos ECO	=(Conversión + Compra equipos ECO – Obsolescencia ECO)	Equipos
21	Compra de equipos ECO	=Fracción de capacidad * (Reposición de equipos + (Crecimiento demanda / Tasa de equivalencia))	Equipos/Year
22	Obsolescencia ECO	= "Equipos ECO" * Tiempo de depreciación ECO	Equipos/Year
23	Tiempo depreciación ECO	=10	Year
24	Consumo energía ECO	=(Potencia ECO * "Equipos ECO" * Tiempo de utilización ECO)	Hour*kW/Year
25	Tiempo de utilización ECO	=10	Hour/Year
26	Potencia ECO	=100	kW/Equipos
27	Costo consumo ECO	=Consumo energía ECO * "Precio kW/h"	\$/Year

Fuente: elaboración propia

En segundo lugar, el bloque financiero cuenta con una variable, *costos*. En este caso la organización se verá afectado por flujo de *costos totales* de los procesos de la firma, los cuales a su vez son controlados de acuerdo con los *costos tradicionales* y los *costos eco* (medidas ecológicas de la empresa) y los costos de producción como se observa en la **Figura 8**.

Como respuesta de las regulaciones ambientales establecidas por los gobiernos locales y nacionales, se evidencia en los estudios realizados por (Aloise & Macke, 2017; Borghesi et al., 2012; del Río, Romero, & Peñasco, 2017; Ociepa & Pachura, 2017; Ryszko, 2015) que los subsidios o el acceso a incentivos fiscales son un impulsor de las innovaciones sostenibles en las empresas, como resultado de la implementación de tecnologías respetuosas con el medio ambiente (Belin et al., 2011; Cai & Li, 2018; Dhull & Narwal, 2016; Horbach, 2008; Pacheco, ten Caten, et al., 2017).

La financiación de eco-innovación puede venir de dos tipos, fuentes internas o externas (Ociepa & Pachura, 2017). Autores como (Bartoszczuk, 2015; Ryszko, 2015; Tsai & Liao, 2017) manifiestan como un obstáculo importante la falta de fondos propios de las organizaciones. Esto sugiere que existe una sensación de que la eco-innovación se asocia frecuentemente con altos niveles de inversión (Tsai & Liao, 2017), mientras que los retornos de esa inversión suelen realizarse a largo plazo. Esta incertidumbre de retorno a la inversión es una barrera que impide la implementación de proyectos sostenibles (Freire, 2018; Ociepa & Pachura, 2017; Sabina Scarpellini et al., 2016; Valero et al., 2017) pero que con apoyo de capital externo puede ayudar a incentivar su implementación (Bartoszczuk, 2015; Ociepa & Pachura, 2017; Ryszko, 2015; Segarra et al., 2015; Valero et al., 2017).

En la **Tabla 4** se observan el sistema de ecuaciones del submodelo de los *Costos totales* con sus respectivas variables, relaciones y unidades.

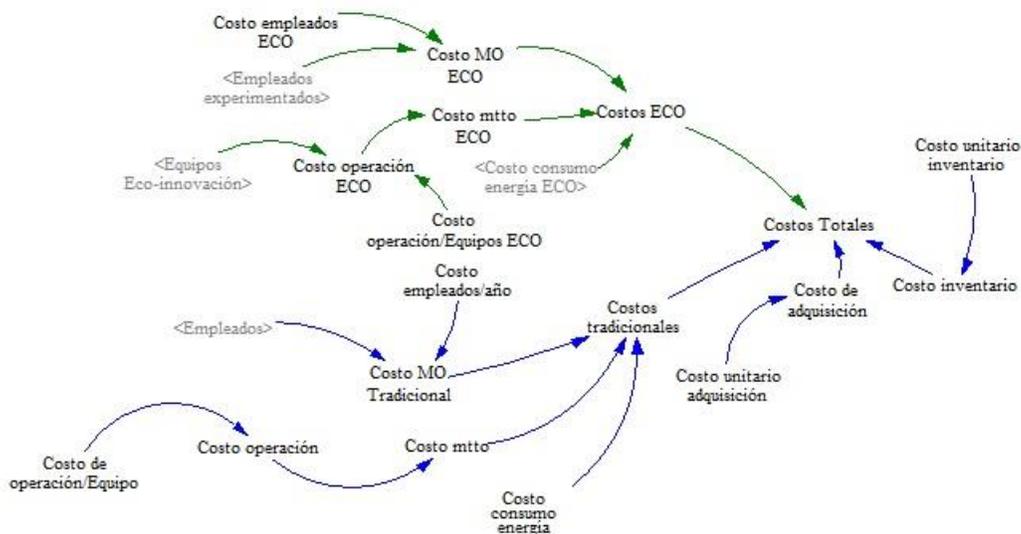


Figura 8. Submodelo financiero
Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Sistema de ecuaciones submodelo financiero

Ítem	Variable	Fórmula	Unidad
1	Costo consumo energía	=Consumo energía * "Precio kW/h"	\$/Year
2	Precio kW/h	=543	\$(kW*hour)
3	Costo operación	=Equipos tradicionales * "Costo de operación/equipo"	\$/Year
4	Costo de operación/equipo	=100	\$(Equipos)/Year
5	Costo mtto	=Costo operación*0.1	\$/Year
6	Costo MO tradicional	=Empleados * "Costo empleados/año"	\$/Year
7	Costo empleados/año	=10	\$/Personas/Year
8	Costos tradicionales	=Costo consumo energía + Costo MP Tradicional + Costo mtto	\$/Year
9	Costo de adquisición	=Costo unitario adquisición * Adquisición	\$
10	Costo unitario adquisición	=1000	\$/MP
11	Costo inventario	=Inventario MP * Costo unitario inventario	\$
12	Costo unitario inventario	=1000	\$/MP
13	Costos totales	=Costo inventario + Costos ECO + Costos tradicionales + Costo de adquisición	\$/Year
14	Costo consumo ECO	=Consumo energía ECO * "Precio kW/h"	\$/Year
15	Costo operación ECO	= "Equipos ECO" * "Costo operación/Equipos ECO"	\$/Year
16	Costo operación/Equipos ECO	=100	\$(equipos)/Year
17	Costo mtto ECO	=Costo operación ECO*0.1	\$/Year
18	Costo MO ECO	=Empleados experimentados * Costo empleados Eco	\$/Year
19	Costo empleados ECO	=10	\$/Personas/Year
20	Costos ECO	=Costo consumo energía ECO + Costo MO ECO + Costo mtto ECO	\$/Year

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, el nivel de *empleados* representa parte de la capacidad instalada de la organización, el cual va aumentando en la medida que se demanden más productos y la tasa de producción aumente, por lo que este se ve afectada por el ingreso de nuevo personal representado por el flujo de *contratación* de personal, este flujo determinará la capacidad de producción de la compañía. Como un proceso normal en toda empresa existe una etapa de despidos o *terminación de*

contratos, que, en este caso, es un flujo de salida de los empleados, el cual para este caso tendrá una tasa de terminación de contrato anual del 10% o el valor que la empresa establezca.

Con el objetivo de mejorar los procesos de producción y de que estos sean ambientalmente sostenibles, es necesario capacitar al personal en dichas temáticas (variable de flujo de capacitación), por lo que también existe un requerimiento de personal con conocimientos ecológicos, el cual, al pasar un tiempo de capacitación, aumenta el nivel de *empleados experimentados* o capacitados, de estos de igual manera, sale un flujo de terminación de contrato. Este nuevo personal con capacidades y conocimientos adicionales se convierten en parte de la capacidad instalada adicional (*Capacidad personal ECO*), los cuales apoyaría de manera más eficiente a los procesos de producción de la empresa (Rydzak & Chlebus, 2007) como se muestra en la **Figura 9**.

Es importante señalar, que si bien la variable de *personal calificado en procesos de eco-innovación* solo obtuvo una calificación del 33,3% por parte de los expertos, estudios demuestran la importancia del capital humano en los procesos de eco-innovación (Portillo-tarragona et al., 2018) ya que la introducción de nuevas tecnologías requiere un personal con ciertas capacidades para operarla (Kijek & Kasztelan, 2013).

En la **Tabla 5** se evidencia el sistema de ecuaciones del submodelo del *Personal* con sus respectivas variables, relaciones y unidades.

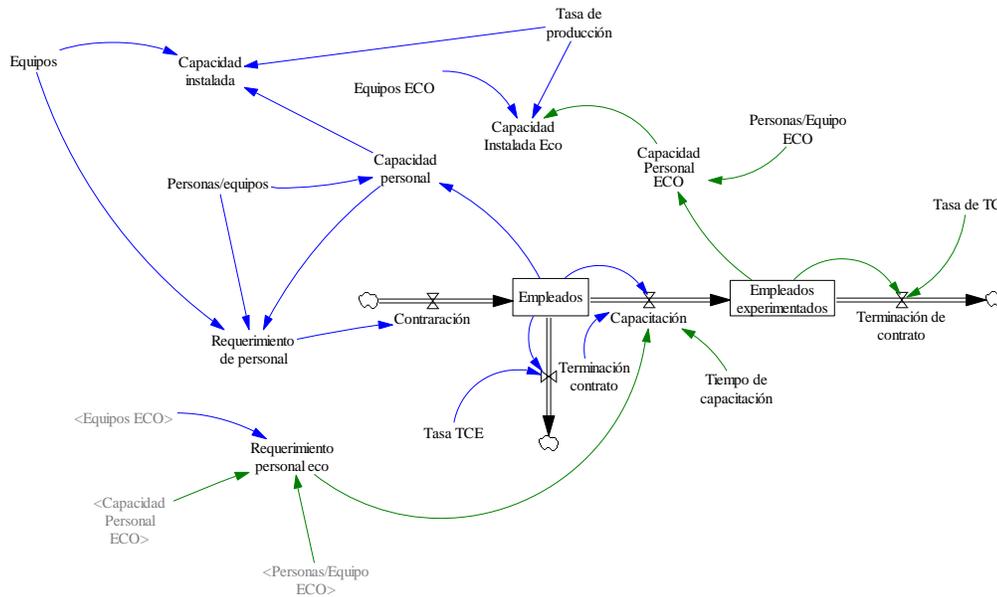


Figura 9. Submodelo personal
Fuente: elaboración propia basado en (Rydzak & Chlebus, 2007)

Tabla 5. Sistema de ecuaciones submodelo personal

Ítem	Variable	Fórmula	Unidad
1	Empleados	=Contratación-Capacitación-Terminación contrato	Personas
2	Contratación	=MAX(0*1{ personas/Year},Requerimiento de personal *1{1/Year})	Personas/Year
3	Requerimiento de personal	=(Equipos tradicionales - Capacidad personal)* "Personas/equipos" + MAX (0, (Requerimiento personal eco-empleados))	Personas
4	Personas/equipos	=1	Personas/Equipos
5	Capacidad personal	=Empleados / "Personas/equipos"	Equipos
6	Capacidad instalada	=Tasa de producción * MIN (Equipos tradicionales, Capacidad Personal)	Unidades/Year
7	Terminación de contrato	MIN (Empleados * Tasa TCE, Empleados * 1{1/year})	Personas/Year
8	Tasa TCE	=0.1	1/Year
9	Capacidad instalada ECO	=Tasa de producción * MIN ("Equipos ECO", capacidad Personal ECO)	Unidades/Year
10	Capacidad personal ECO	=Empleados experimentados / "Personas/equipo ECO"	Equipos
11	Personas/Equipos ECO	=1	Personas/equipo
12	Capacitación	=MAX (0, MIN (Empleados * 1{1/Year} - Terminación contrato, Requerimiento personal ECO * Tiempo de capacitación)	Personas/Year
13	Tiempo de capacitación	=10	Year
14	Requerimiento personal ECO	=("Equipos ECO" -Capacidad Personal ECO) * "Personas/Equipos ECO"	Personas
15	Empleados experimentados	=Capacitación - Terminación de contrato	Personas
16	Terminación de contrato	=MIN (Empleados experimentados * Tasa de TC, Empleados experimentados * 1{1/Year})	Personas/Year
17	Tasa de TC	=0.1	1/Year

Fuente: elaboración propia

Y, por último, como en la **Figura 10** se observa el submodelo empleado para simular y validar la estructura del proceso de producción y materia prima (MP) del sistema analizado. En este se encuentra el nivel de que acumula el inventario de materia prima (inventario MP), el cual varía de acuerdo con flujo de *adquisición* de materia prima. Esta variable de nivel de *Inventario MP*, es la combinación de materias primas, suministrada por proveedores externos y el reciclaje de productos (flujo representado por *desechos*) (Das & Dutta, 2013), recuperado en el proceso de producción. Con estos componentes reutilizados se espera reducir los costos asociados a la adquisición de materia prima (Das & Dutta, 2013). De este nivel de *inventario de MP* se espera que se use la materia prima (variable de flujo) para realizar la transformación en *inventario de productos* en el proceso de producción, donde el nivel de *inventario de productos* aumenta o disminuye de acuerdo con la tasa de producción y de acuerdo con la demanda del mercado.

La capacidad de producción y de respuesta al mercado (*demanda*) de la organización se ve afectada por la *capacidad instalada* tradicional (cantidad de *equipos tradicionales* y *Empleados* para la operación y de dicha maquinaria), así como de la capacidad ECO (cantidad de *equipos ECO* y *Empleados experimentados* para la operación y de dicha maquinaria).

En la **Tabla 6** se evidencia el sistema de ecuaciones del submodelo de *Producción* con sus respectivas variables, relaciones y unidades.

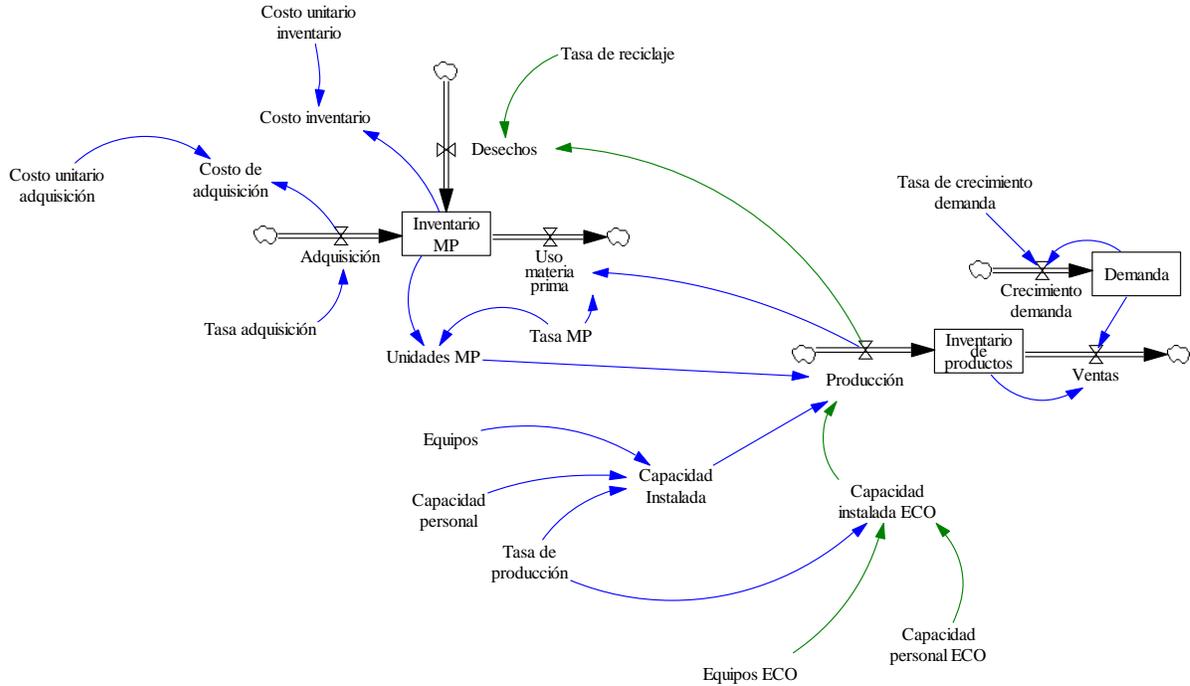


Figura 10. Submodelo producción

Fuente: elaboración propia basado en (Das & Dutta, 2013; Georgiadis & Michaloudis, 2012; Rydzak & Chlebus, 2007; Vlachos et al., 2007)

Tabla 6. Sistema de ecuaciones submodelo producción

Ítem	Variable	Fórmula	Unidad
1	Tasa de adquisición	=1000	MP/Year
2	Adquisición	=Tasa de adquisición	MP/Year
3	Uso de materia prima	=Producción/Tasa MP	MP/Year
4	Inventario MP	=Adquisición + Desechos-Uso materia prima	MP
5	Tasa MP	=10	Unidades/MP
6	Desechos	=MAX (0, Producción*Tasa de reciclaje)	MP/Year
7	Tasa de Reciclaje	=100	MP/Unidades
8	Producción	=MIN(Unidades MP*1{1/Year}, (Capacidad Instalada + Capacidad Instalada ECO))	Unidades/Year
9	Unidades	=Producción-Ventas	Unidades
10	Ventas	=MIN (Demanda, Unidades*1{1/Year})	Unidades/Year
11	Demanda	=Crecimiento demanda	Unidades
12	Crecimiento demanda	=Demanda*Tasa de crecimiento demanda	Unidades/Year
13	Tasa de crecimiento demanda	=0.05	1/Year
14	Capacidad instalada	=Tasa de producción * MIN (Equipos tradicionales, Capacidad Personal)	Unidades/Year
15	Tasa de producción	=100	Unidades/(equipos*Year)
16	Capacidad instalada ECO	=Tasa de producción*MIN("Equipos ECO", capacidad Personal ECO)	Unidades/Year

Fuente: elaboración propia

4.4 Resultados de simulación

Los análisis de los resultados del modelo proporcionan información de cómo el modelo representa los principales comportamientos del sistema real. Teniendo en cuenta que no se cuentan con información de una organización en particular para evaluar de manera empírica el modelo, se evaluó el modelo para validar de manera cualitativa el comportamiento de este.

En la **Figura 11** se observa como cada año en el horizonte de tiempo de la simulación los *equipos tradicionales* empleados para los procesos de producción van disminuyendo, debido a la compra de equipos más eficientes, estos equipos ecológicos poseen mejor capacidad de producción generando mayores unidades en menor tiempo y consumiendo menos energía, lo que genera una disminución en la adquisición de equipos tradicionales.

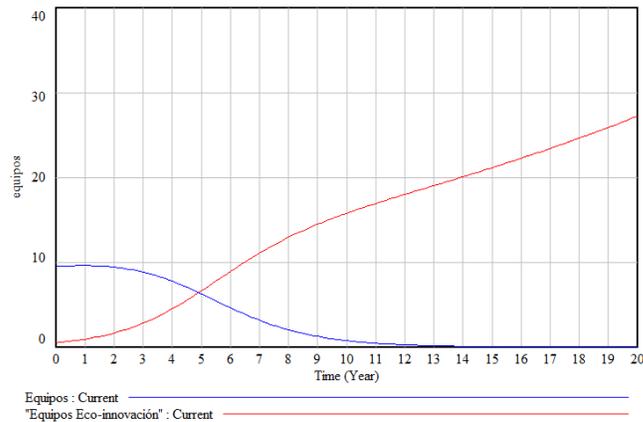


Figura 11. Comportamiento variable equipos
Fuente: elaboración propia

Por otro lado, los *equipos ECO* a medida que pasa el tiempo se van adquiriendo más equipos ecológicos, por lo que se evidencia una tendencia a adquirir más equipos a medida que pasa el tiempo como se muestra en la **Figura 11**, ello producto de la alta demanda de unidades que requiere el mercado. Además, estos equipos permiten producir mayor cantidad de unidades en comparación con los equipos tradicionales. Asimismo, consumen menos energía y generan menos costos de operación (mantenimiento de equipos). Lo que significa que se está presentando una mayor adopción de tecnología eficiente por la forma de la curva sigmoideal, de manera similar al modelo planteado por Bass. Se observa un comportamiento lento en los primeros años, sin embargo, este va aumentando a medida que pasa el tiempo. Según Aracila & Gordillo (1997) este tipo de comportamientos es común en los procesos dinámicos, ya que es normal que el proceso de crecimiento asociado a un ciclo de realimentación positiva se encuentre en cualquier momento con sus límites, como se muestra en la **Figura 6**. En la **Figura 11** se observa el comportamiento de las dos variables.

La *demand*a como factor económico, el cual depende del nicho de mercado, en este caso se tomó con un comportamiento creciente como se muestra en la **Figura 12**, aumentando anualmente a una tasa del 5%, lo que afecta de manera positiva las ventas de la organización, ya que se debe generar más unidades, y esto aumenta las utilidades de la compañía. El aumento de la demanda afecta directamente el nivel de adopción de tecnología, es decir, la compra de equipos ecológicos o de

equipos tradicionales. Se debe aclarar que esta es una variable exógena y que el comportamiento del modelo puede variar de acuerdo con el comportamiento real de esta.

Para Aloise & Macke (2017); Kijek (2013); Ociepa & Pachura (2017); Segarra et al. (2015) la demanda del mercado está influenciada por la consciencia ambiental que han venido adquiriendo los clientes en los últimos años (Hojnik et al., 2017; Horbach, 2008; Tsai & Liao, 2017). Algunos estudios sostienen que los clientes pueden impulsar la innovación ecológica, ya que presionan a las empresas a mejorar el desempeño ambiental, derivado de sus procesos de producción y comercialización (Frondel et al., 2007; Kammerer, 2009; Rehfeld, Rennings, & Ziegler, 2007; Triguero et al., 2013). Y no solo la presión del mercado, sino también las presiones de organizaciones ambientalistas influyen en la mejora del desempeño ambiental de la firma (Dhull & Narwal, 2016; Freire, 2018; Frondel et al., 2007; Rashid et al., 2015; Segarra et al., 2015; Valero et al., 2017). Es por eso que las empresas que carecen de capacidad tecnológica es poco probable que puedan satisfacer las demandas de los clientes (Cai & Li, 2018; Cainelli, De Marchi, & Grandinetti, 2015; del Río et al., 2017; Pacheco, ten Caten, et al., 2017; Tsai & Liao, 2017).

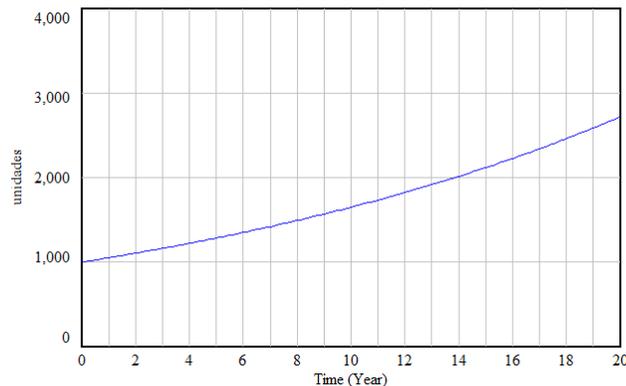


Figura 12. Comportamiento variable demanda
Fuente: elaboración propia

En la **Figura 13** se evidencia cómo los *costos tradicionales* a medida que pasa el tiempo van disminuyendo, mientras que los *costos ECO* van aumentando, esto quiere decir que cada vez se está realizando mayores inversiones en procesos sostenibles en la organización, lo cual genera beneficio a la empresa y que los costos más representativos son los costos ECO. De igual manera se puede observar en la figura el comportamiento creciente de la variable de costos totales, esto significa que a medida que pasa el tiempo estos van aumentando, pero es importante aclarar que el hecho de que los *costos ECO* aumenten (al ser los más representativos) y afecten el comportamiento de los costos totales, no necesariamente la organización esté incurriendo en sobrecostos. Es decir, la variación en los costos es proporcional al comportamiento del nivel de los equipos. En la **Figura 14** se observa

el comportamiento de las variables de costos de manera desagregada y se observa como los costos tradicionales tienen un comportamiento decreciente, mientras que los costos ECO tienen un comportamiento creciente, al igual que la variable de Inversión de equipos tradicionales y equipos eco-innovación como se muestra en la **Figura 15**.

Por otro lado, en la **Figura 16**, se observan dos escenarios, en el primer escenario la organización adquiere de manera progresiva equipos más eficientes, en la simulación se observa como el comportamiento es el esperado, que entre más equipos ecológicos se adquieran los costos tradicionales totales disminuyen. Sin embargo, en el escenario de simulación dos, donde no se adquiere ningún equipo ecológico, la variable de costos tradicionales muestra un comportamiento creciente, lo que indica que, si no se invierte en equipos ecológico se incurren en altos costos de operación.

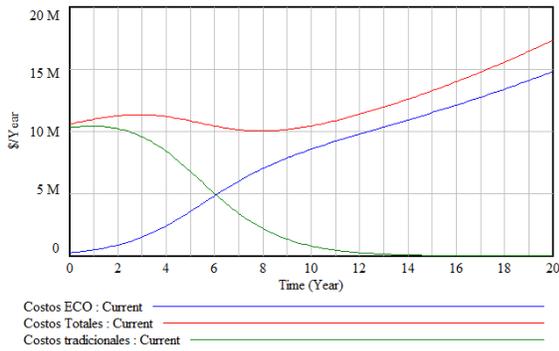


Figura 13. Comportamiento variable de costos
Fuente: elaboración propia

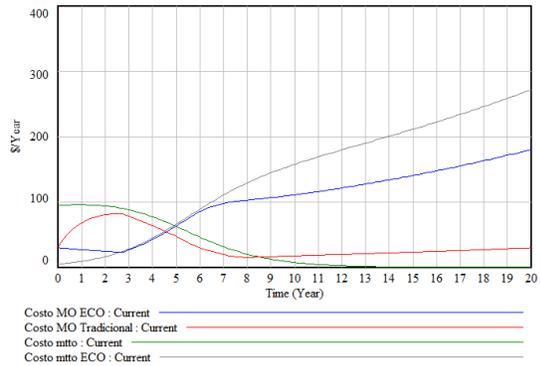


Figura 14. Comportamiento variable de costos desagregados
Fuente: elaboración propia

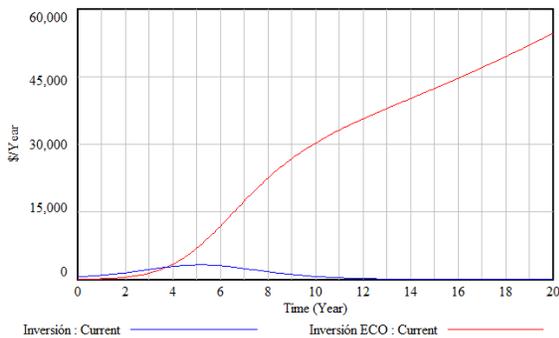


Figura 15. Comportamiento variable de inversión en tecnología
Fuente: elaboración propia

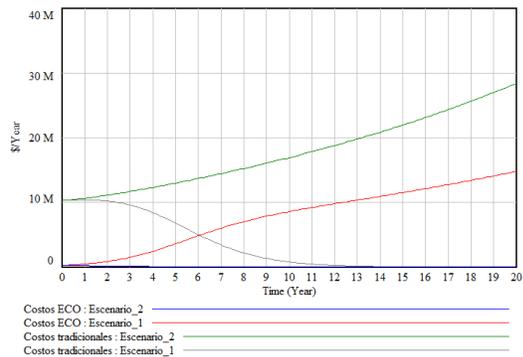


Figura 16. Comportamiento variable costos sin inversión en equipos ECO
Fuente: elaboración propia

En cuanto a la *capacidad instalada*, la cual representa el potencial de producción de una empresa que manufactura materia prima, se muestra en la **Figura 17**, entre los años 4 y 5 es evidente la variación de la *capacidad instalada ECO*, esta aumenta considerablemente y luego de manera exponencial, mientras que la capacidad instalada tradicional disminuye, es decir, que la mano de obra se vuelve cada vez más capacitada, se realizan actividades de reciclaje en el proceso de producción, se invierte en más equipos eficientes y ello aumenta la capacidad de producción de la compañía como se muestra en la **Figura 18**.

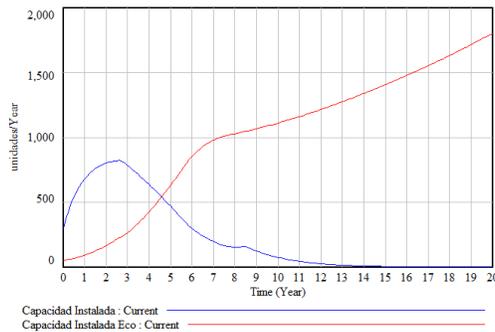


Figura 17. Comportamiento variable capacidad instalada

Fuente: elaboración propia

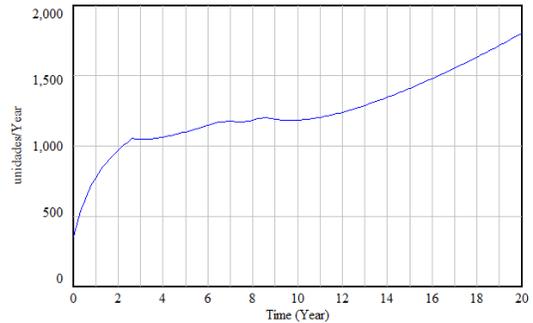


Figura 18. Comportamiento variable producción

Fuente: elaboración propia

La **Figura 19** muestra el comportamiento de las actividades de reutilización de desechos (reciclaje) llevadas a cabo en la organización, la curva es similar a la **Figura 18** de producción, ya que el material recuperado es el que ya es procesado, y entre más unidades elaboradas más material es reciclado como resultado de defectos o devoluciones de clientes. Entre más producción, más material recuperado.

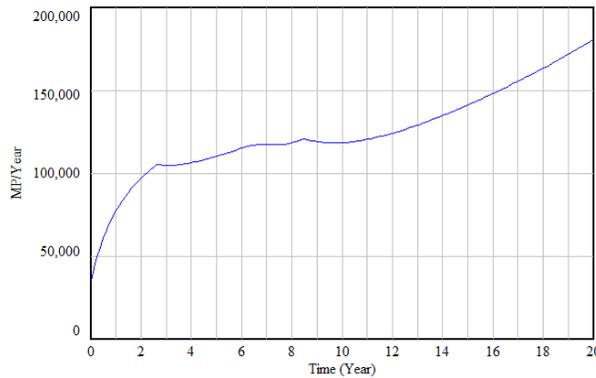


Figura 19. Comportamiento variable desechos

Fuente: elaboración propia

4.5 Validación del modelo

La validación del modelo se puede plantear como una forma de comprobar si la estructura y el comportamiento de este brinda una representación lo suficientemente precisa y coherente del sistema que se está evaluando. Sólo después de validar la estructura, se procede con probar su comportamiento (Barlas, 1996). Si éste falla en las simulaciones, se debe ajustar hasta que cumpla con las condiciones del sistema en estudio (Müller et al., 2013). De igual manera, el modelo que se planteó en esta investigación es un modelo genérico, el cual puede ser puesto en práctica a través de datos empíricos en una organización específica.

4.5.1 Pruebas de estructura

El modelo se construyó de manera agregada, es decir, mediante el desarrollo de submodelos más detallados que admita su comportamiento con una representación más agregada. Se validó cada uno de los submodelos de manera independiente y que estos fueran acordes a la realidad en estudio, esto permite que cuando se agreguen se tenga más certeza de la validez del modelo (Barlas, 1996), e identificar si este nivel de detalle afecta o no de manera significativa los resultados finales del modelo. Tanto los submodelos como sus respectivos diagramas causales se elaboraron teniendo como referentes ejemplos de la literatura tales como: (Das & Dutta, 2013; Georgiadis & Michaloudis, 2012; Rydzak & Chlebus, 2007; Vlachos et al., 2007) y el modelo de transición de energía Vensim. De igual manera, se analizaron las ecuaciones del modelo, confirmándose así la estructura del modelo.

Se verificó también la coherencia dimensional entre variables, las relaciones lógicas y las unidades, en las Tablas 3, 4, 5 y 6 se observan la consistencia dimensional de las unidades del modelo. Las variables del modelo fueron revisadas una a una con el objetivo de identificar unidades que no fuesen coherentes con las unidades reales del sistema. Es así como estas presentan coherencia dimensional, lo que permite realizar los cálculos del modelo.

4.5.2 Pruebas de comportamiento

Este tipo de pruebas evalúa la estructura del modelo de forma directa, en este sentido se emplea la simulación (Barlas, 1996). Entre las pruebas de comportamiento se tienen las de condiciones extremas y análisis de sensibilidad.

En la **Figura 20** se observa cómo el modelo diseñado tiene un comportamiento igual al planteado por Bass (1969) en su modelo de difusión de nuevos productos, el cual consiste en la

interacción de un adoptador actual y un adoptador potencial sobre un producto para su posterior adopción, bien sea por los medios de comunicación o por la publicidad boca a boca. Para este caso, en la conversión de equipos tradicionales a equipos de ecológicos.

Se evidencia en la curva de la **Figura 20**, *Fracción de capacidad*, el proceso de adopción de las eco-innovaciones del presente proyecto, donde dicha adopción está definida por dos factores de influencia interna y externa (*demanda*) (Kumar, Shankar, & Momaya, 2015), lo cual quiere decir que después de cierto tiempo todos los equipos tradicionales de la organización realizan una transición a equipos más eficientes (*equipos ECO*).

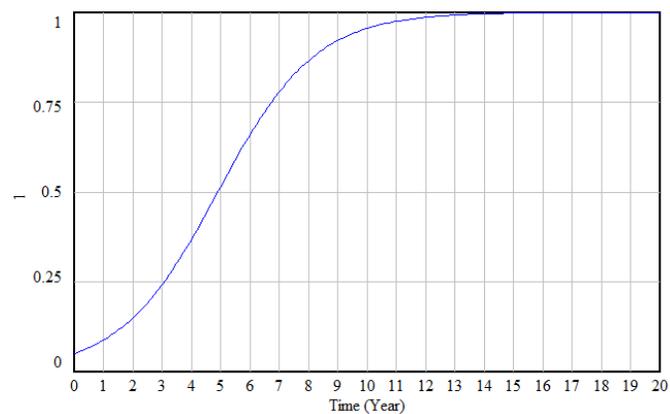


Figura 20. Simulación Fracción de capacidad
Fuente: elaboración propia

La **Figura 21** muestra la distribución del crecimiento del modelo de Bass, es decir, el proceso de transición de *equipos tradicionales* a *equipos ECO*. El comportamiento inicial es un poco lento por el escaso conocimiento que se tiene respecto a los beneficios de los equipos con características eficientes. Pese a que el número de equipos tradicionales es considerablemente pequeño, se evidencia que la adquisición de nuevos equipos (equipos eficientes) aumenta rápidamente. Sin embargo, al aumentar la *tasa de contacto* como factor influyente en el cambio de capacidad tradicional a nueva, el crecimiento en los equipos ECO es mucho más rápido (ver **Figura 22**).

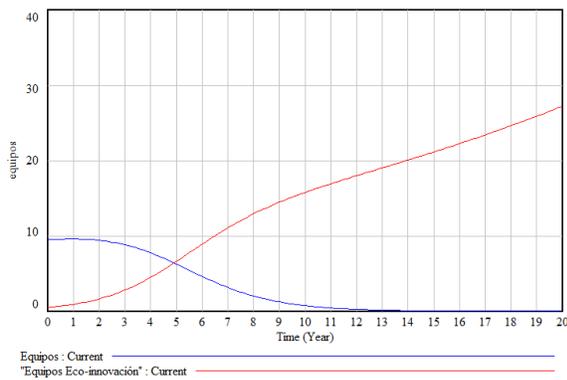


Figura 21. Simulación Equipos tradicionales vs. Equipos ECO
Fuente: elaboración propia

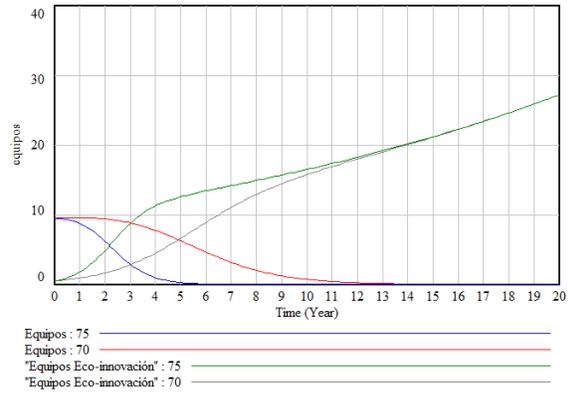


Figura 22. Modificación Tasa de contacto
Fuente: elaboración propia

4.5.3 Pruebas de valores extremos

Este tipo de pruebas son importantes ya que al exponer el modelo a condiciones extremas es posible identificar defectos del modelo en su estructura. Si se realizan modificaciones considerables a los valores de entrada, el modelo debe responder igual que el sistema real si es expuesto a situaciones extremas. Para este análisis se hicieron suposiciones como: ¿qué pasa si la demanda es cero?, ¿qué pasa si el flujo de contratación de empleados es cero? ¿qué pasa si la adquisición de materia prima es cero? En esta última suposición se analizaron los niveles de *Inventario MP* e *Inventario de productos*. En cada una de estas situaciones el comportamiento del modelo fue consistente con el sistema real como se muestra en la **Figura 23**, **Figura 24**, **Figura 25** y **Figura 26**.

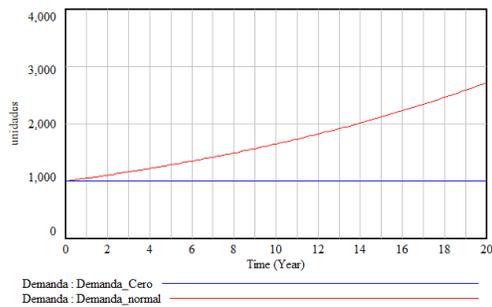


Figura 23. Prueba flujo de demanda cero vs normal
Fuente: elaboración propia

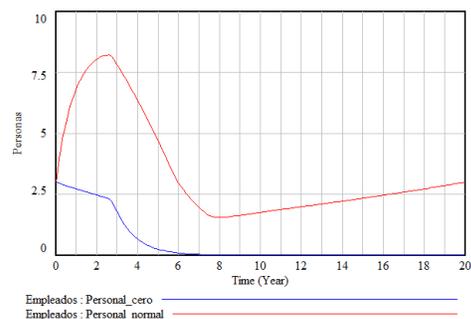


Figura 24. Prueba flujo de empleados cero vs normal
Fuente: elaboración propia

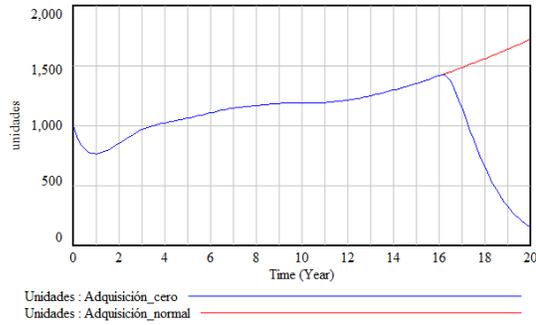


Figura 25. Prueba flujo de adquisición de materia prima cero vs normal (nivel Inventario de productos)
Fuente: elaboración propia

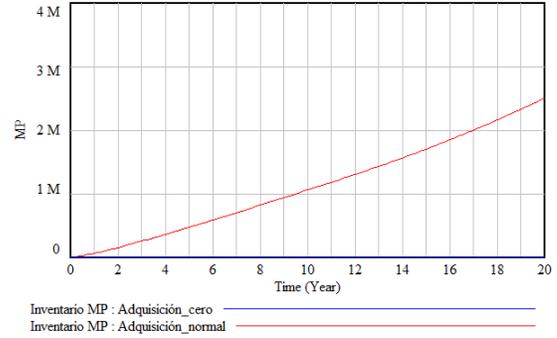


Figura 26. Prueba flujo de adquisición de materia prima cero vs normal (nivel Inventario MP)
Fuente: elaboración propia

4.5.4 Análisis de sensibilidad

Esta prueba precisa cuáles son los parámetros a los cuales el modelo es sensible y de los cuáles no se tiene certeza. Los parámetros que se seleccionaron para realizar el análisis de sensibilidad fueron: *fracción de conversión, tasa de crecimiento de la demanda y tasa de producción*. Estos parámetros fueron seleccionados debido a la importancia dentro del modelo. Para la *fracción de conversión* se tomaron valor del 10%, 15% y 20%. Para *Tasa de crecimiento de la demanda* se tomaron crecimientos del 5%, 10% y 15% anual y para la *Tasa de producción* se tomaron valores de 100, 200 y 300 unidades anuales.

Como resultado de las simulaciones variando los valores anteriormente mencionados, se tiene que el modelo es sensible a la fracción de conversión. Si la fracción es menor al 15% no hay congruencia con los resultados y no existe transición en la actualización tecnológica y cada vez se adquieren más equipos tradicionales. Por otro lado, si el valor es superior al 15% el proceso de conversión es mucho más rápido, en este caso se empieza a realizar antes del año uno, en comparación si la tasa fuese del 15% que se empieza a evidenciar antes del año cinco como se muestra en la **Figura 27**.

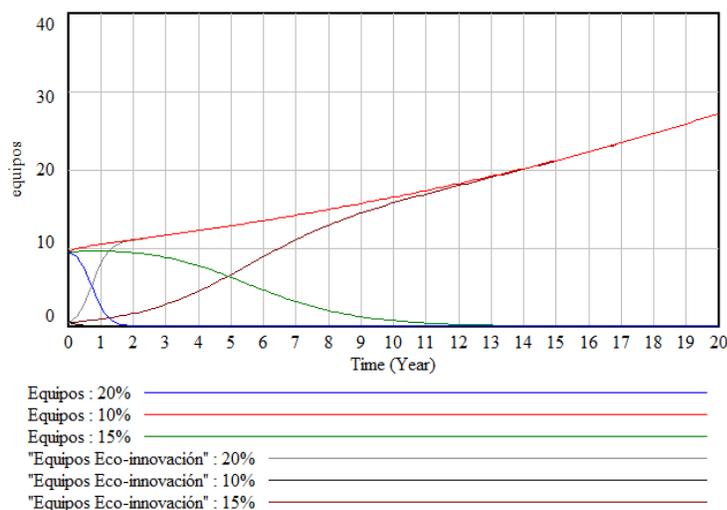


Figura 27. Modificación Fracción de conversión
Fuente: elaboración propia

Al variar la tasa de crecimiento de la demanda, se obtiene que, a mayor tasa de demanda, los niveles de producción aumentan considerablemente, llegando a más de 10 mil unidades al año cuando la tasa de crecimiento es del 15% como se muestra en la **Figura 28**. Se observan en los tres casos que al menos a partir del año tres el comportamiento de la producción es el mismo, pero luego del año cuatro aumentan las unidades producidas en la medida que aumenta la proporción de la demanda.

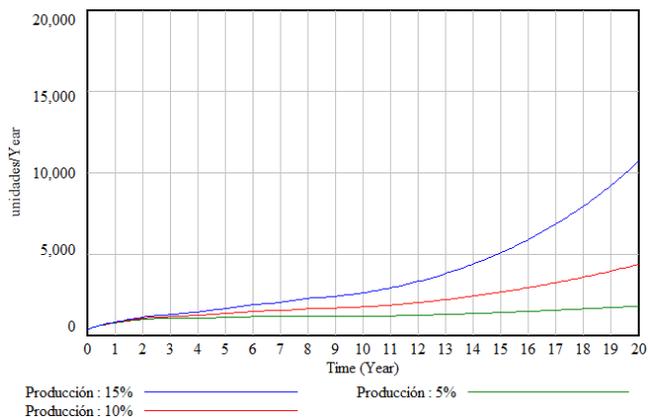


Figura 28. Modificación Tasa de crecimiento demanda
Fuente: elaboración propia

Por último, al variar la tasa de producción con valores entre 100 y 300 unidades fabricadas por equipo anualmente, se observa en la **Figura 29** que los niveles de producción aumentan considerablemente, pasando de una tasa de producción de 100 en el año 2 fabricando aproximadamente 968 unidades, en comparación con una tasa de 300 en el mismo año fabricando 2.903 unidades. En este caso el comportamiento o forma de la gráfica se mantiene estable de manera

considerable, sin embargo, las unidades producidas se logran triplicar en la medida que aumenta la tasa de producción.

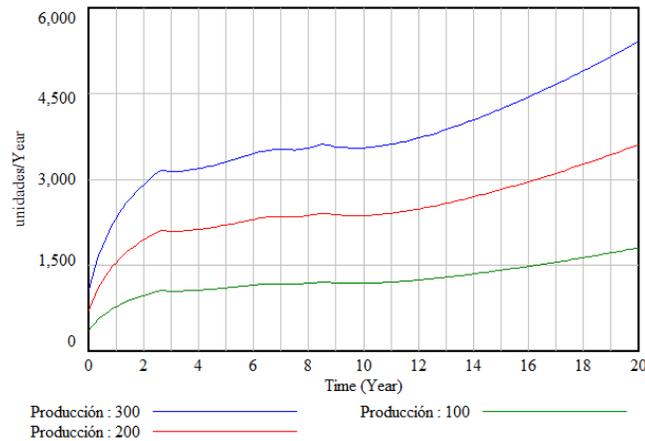


Figura 29. Modificación Tasa de producción
Fuente: elaboración propia

De las pruebas de validación se tiene que el modelo es sensible a las variables seleccionadas y simuladas y son las esperadas de acuerdo con el conocimiento del sistema real analizado. Es así como se ha generado un grado de confianza con el modelo propuesto. Sin embargo, el parámetro que requiere mayor atención en el presente modelo es la fracción de conversión de los equipos tradicionales a ecológicos, ya que dependiendo de la velocidad a la que se realice la transición dependerá la disminución de costos de producción, de consumo de energía, entre otros ahorros asociados a la actualización tecnológica.

4.5.5 Prueba de error de integración

Esta prueba permite comprobar el nivel de sensibilidad de los resultados con respecto al tiempo de paso y el método de integración. Para el caso del presente modelo, el tiempo de paso seleccionado fue de un año y el método de integración empleado fue Runge-Kutta de orden cuatro. En la **Figura 30** se puede observar la simulación con la variación del método de integración y en la **Figura 31** la modificación en el paso de integración y se evidencia que el modelo es poco sensible al tipo de integración seleccionado y a los pasos de integración.

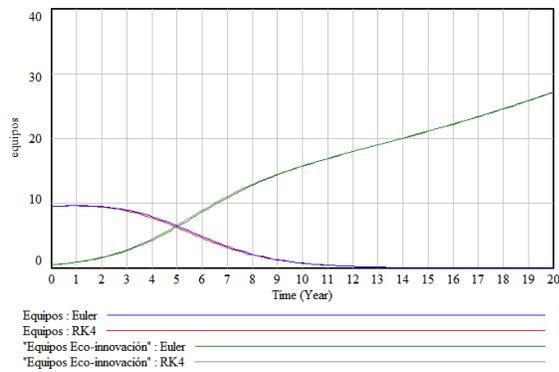


Figura 30. Modificación del tipo de integración
Fuente: elaboración propia

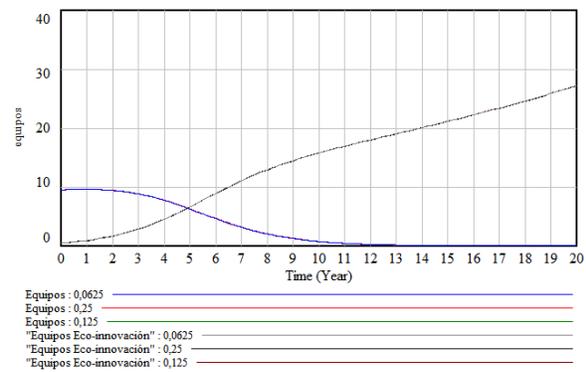


Figura 31. Modificación del paso de integración
Fuente: elaboración propia

4.6 Diseño de estrategias

Como lo mencionan He, Miao, Wong & Lee (2018) las empresas deben tener clara la posición en términos de implementación de eco-innovación para mejorar el desempeño general. Todo ello dependiendo de las capacidades que posea la organización y de sus niveles de recursos. Por lo tanto, las tres dimensiones principales para la implementación de eco-innovaciones son: eco-productos, eco-procesos y eco-organizaciones como lo mencionan los autores en su investigación:

- La *implementación de eco-productos* entregará como resultados productos ecológicos analizando su ciclo de vida y obtener resultados positivos para el medio ambiente, por ejemplo, productos diseñados con materiales mejorados.
- La *implementación de procesos ecológicos* incluye una producción mucho más eficiente. Introduce tecnología eficiente energéticamente, controlando así, la contaminación a través de generación mínima o nula de GEI. Para ello es necesario cambios decisivos en el proceso, siendo éstas, innovaciones radicales de proceso.
- La *implementación de organizaciones ecológicas*: este tipo de organizaciones posibilita la implementación de los anteriores tipos de eco-innovaciones, pues faculta a los empleados con conocimientos y capacidades necesarias para generar productos y procesos sostenibles ambientalmente.

4.6.1 Simulación y evaluación de estrategias

Debido a la adaptabilidad de la DS para simular escenarios hipotéticos, evaluar políticas y estrategias, con respecto a los posibles impactos ambientales, sociales y económicos, se evaluaron dos estrategias para simular los potenciales resultados en el sistema ajustando los parámetros dentro

del modelo y variar algunas especificaciones, de igual manera, asociándolas a las tres dimensiones de eco-innovación: producto, proceso y organización. La formulación de estrategias comprende la construcción de teorías, y en DS se emplea la simulación para probar propuestas de políticas. No obstante, en estos casos la mejor alternativa es modificar la estructura del sistema que variar los valores de los parámetros (Forester, 1994), por eso en este caso se realizaron modificaciones en la estructura para simular las alternativas de políticas, las cuales fueron: *contratación de personal con experiencia* de la dimensión organizacional, *uso de menor cantidad de materia prima* y *modificación de la tasa de producción* en la dimensión de procesos, que de acuerdo con la simulación en el modelo se obtuvieron los siguientes resultados:

▪ **Contratación de personal con experiencia y conocimientos en temas sostenibles**

La implementación de eco-organizaciones hace referencia a la reorganización de rutinas, procedimientos, estructuras y sistemas para tratar los problemas ecológicos, mejorando el rendimiento de la organización. Comprende también la puesta en marcha de sistemas de gestión ambiental, gestión de cadena de suministro más eficiente ecológicamente, programas de capacitación de los empleados o colaboradores en temas relacionados con sostenibilidad ambiental.

Normalmente la implementación de eco-organizaciones no reduce los impactos ambientales, pero sí facilita la implementación de eco-productos y eco-procesos. Por eso, se plantearon las siguientes estrategias:

- *Estrategia 1*: un sistema de producción en el que el personal es capacitado en asuntos sostenibles desde dentro de la organización,
- *Estrategia 2*: contratación directa de personal con ciertas habilidades tales como: maniobrar equipos, realizar actividades de reciclaje de material generado en el proceso de producción, diseñar nuevos productos o servicios que sean ecológicamente sostenibles, entre otras acciones de investigación y desarrollo (I+D) que genere un beneficio a la organización.

Para analizar estas estrategias se realizaron modificaciones en la estructura del submodelo de la variable del personal (ver **Figura 9**) y como se observa en la **Figura 32** no se llevan a cabo capacitaciones en temas de sostenibilidad al interior de la organización, sino que se realiza una contratación directa de personal capacitado.

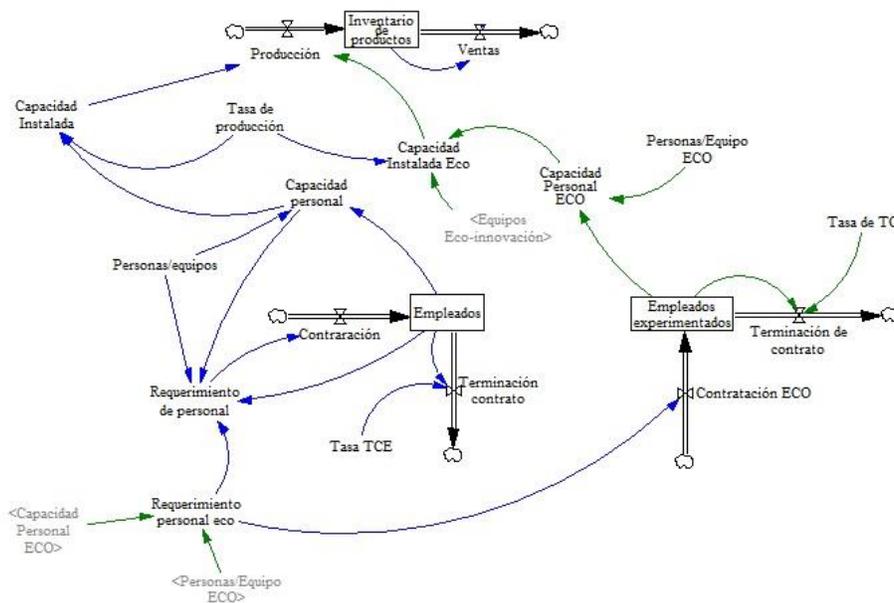


Figura 32. Modificación estructura de personal
Fuente: elaboración propia

En la **Figura 33** y **Figura 34** se observa el comportamiento de las variables de capacidad instalada tradicional y capacidad instalada Eco, de cómo al contratar personal con conocimientos ambientalmente sostenibles de manera previa esta capacidad aumenta de manera considerable.

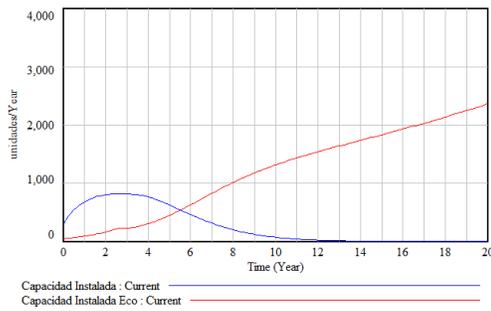


Figura 33. Capacidad instalada con estrategia de contratación de personal
Fuente: elaboración propia

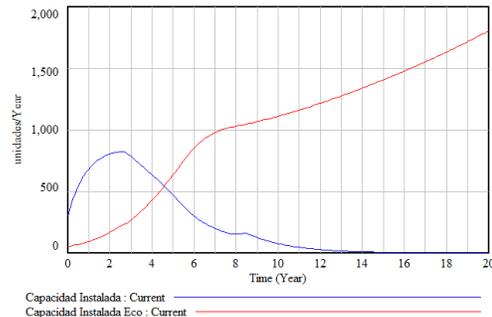


Figura 34. Capacidad instalada sin estrategia de contratación de personal
Fuente: elaboración propia

Por otro lado, con la aplicación de esta misma política el comportamiento en las unidades de producción es similar como se observa en la **Figura 35** y **Figura 36**. Es decir, al contratar personal con estas habilidades de manera previa se obtienen mayores unidades de producción, dicha variación se puede deber a que la organización no tiene que gastar ni tiempo ni dinero en la fabricación de dichos productos, por lo que se puede aprovechar la mano de obra contratada de manera inmediata.

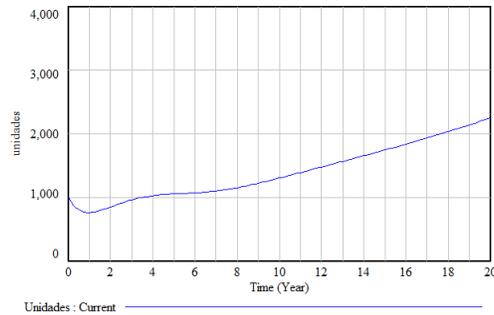


Figura 35. Variable Inventario de productos con estrategia de contratación de personal
Fuente: elaboración propia

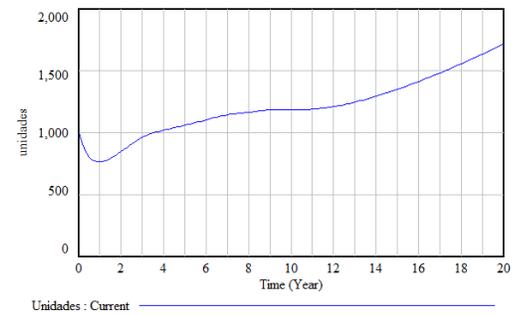


Figura 36. Variable Inventario de productos sin estrategia de contratación de personal
Fuente: elaboración propia

La implementación de eco-innovaciones en el aspecto de contratación y capacitación de personal tiene efectos positivos a nivel social como resultado de los cambios en la forma de trabajo, ya que se crean nuevos puestos de trabajos necesarios para gestionar los procesos sostenibles que se implementen en la organización. Esto en cierta medida puede ayudar a mejorar la calidad de vida de los empleados, aumentando sus niveles de ingresos.

▪ **Eficiencia en el uso de materias primas**

Para el análisis de esta segunda política se han considerado dos estrategias:

- *Estrategia 1:* adquisición de materia prima convencional
- *Estrategia 2:* uso de materias primas eficientes

Para analizar estas estrategias se realizaron modificaciones en la estructura del submodelo de la variable de producción (ver **Figura 10**) y como se observa en la **Figura 37** se realizan dos procesos de adquisición de materia prima, una materia prima convencional y materia prima con características más eficientes.

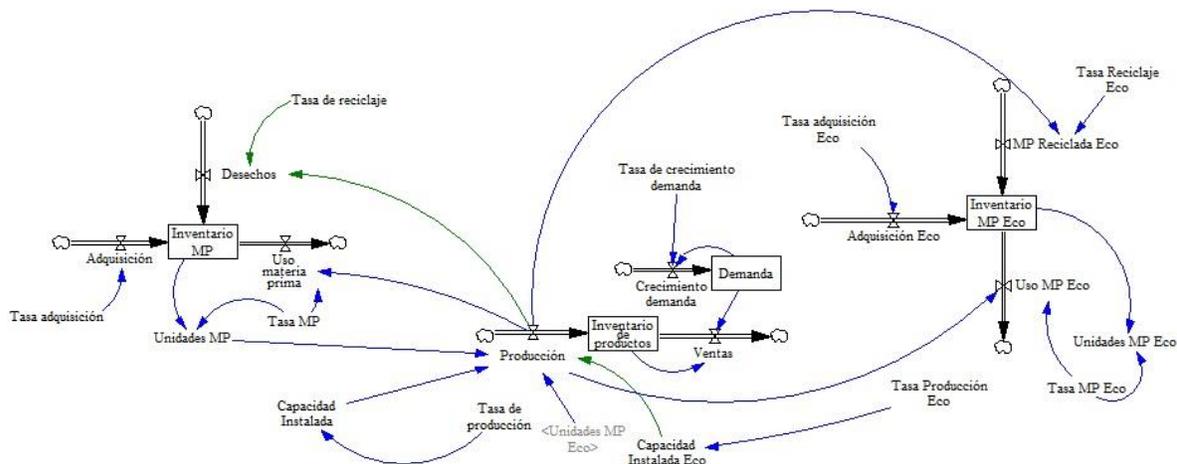


Figura 37. Modificación estructura de adquisición de materia prima
Fuente: elaboración propia

Se observa entonces a continuación el comportamiento de las unidades de producción si hay un uso eficiente de materias primas, es decir, hay menos desperdicios por parte del sistema de producción, por lo que se estaría contratando una mano de obra con capacidad de aprovechar los recursos y equipos ecológicos que generan menos residuos y más aprovechamientos de la materia prima, por lo que en la **Figura 38** se evidencia un aumento considerable en las unidades producidas, un poco más de 2.146 unidades en el año 20, mientras que en la **Figura 39** se observa un comportamiento mucho menor, 1.713 unidades en el mismo año.

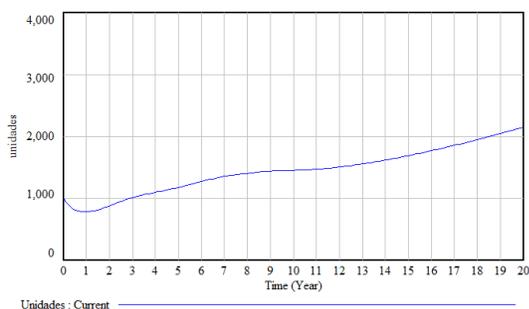


Figura 38. Variable Inventario de productos con estrategia de uso de menor MP
Fuente: elaboración propia

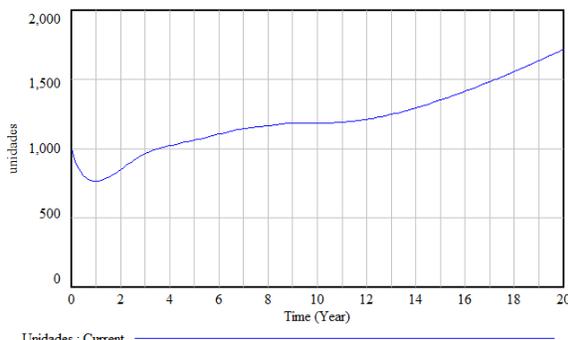


Figura 39. Variable Inventario de productos sin estrategia de uso de menor MP
Fuente: elaboración propia

Por otra parte, el comportamiento de la variable de costos totales de la organización presenta un comportamiento similar a las figuras anteriores, se observa en la **Figura 40** como aplicando la política, la organización obtiene unos costos superiores a los presentados en la **Figura 41**.

Por lo anterior, se evidencia un uso eficiente en los recursos, es decir, se generarían menos desperdicios si se aplicara la segunda estrategia. Por lo que se considera importante invertir en este tipo de actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) al interior de la organización que aumenten los beneficios y la productividad de la organización.

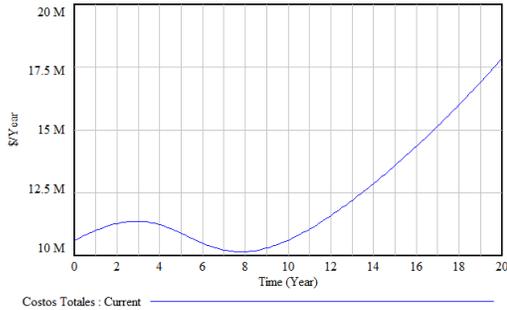


Figura 40. Variable Costos Totales con estrategia de uso de menor MP

Fuente: elaboración propia

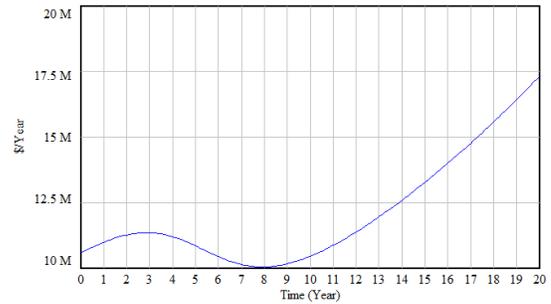


Figura 41. Variable Costos Totales sin estrategia de uso de menor MP

Fuente: elaboración propia

▪ **Tasa de producción ecológica**

Para esta tercera política se consideraron dos estrategias:

- *Estrategia 1:* combinación de la capacidad instalada tradicional y la capacidad instalada ecológica, lo que permite obtener una única tasa de producción, en este caso la tasa de producción es menor a la tasa de producción de eco-innovación.
- *Estrategia 2:* tasa de producción tradicional independiente a la tasa de producción de eco-innovación, donde esta última es mayor a la tradicional. Es decir, hay una independencia entre la capacidad instalada tradicional y ecológica.

Para analizar estas estrategias se realizaron modificaciones en la estructura del submodelo de la variable de producción (ver **Figura 10**) y como se observa en la **Figura 42** se establecen dos tasas de producción, una tasa de producción tradicional (*tasa de producción*) y una tasa de producción ecológica (*tasa Pdn Eco*) de manera independiente.

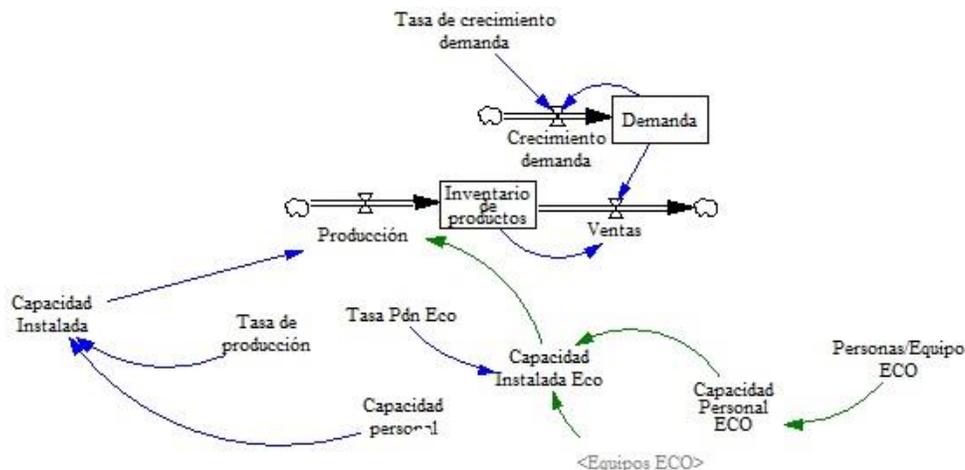


Figura 42. Modificación estructura tasa de producción
Fuente: elaboración propia

Se observa que al aplicar esta tercera política la variable de *Inventario de productos*, en la medida en que se aplique una tasa de producción ecológica independiente a la tasa de producción convencional, las unidades producidas aumentan como se evidencia en la **Figura 43**, en comparación si no se aplica la política y se mantiene una tasa de producción combinando la capacidad instalada tradicional y ecológica, donde las unidades son un poco menor como se observa en la **Figura 44**.

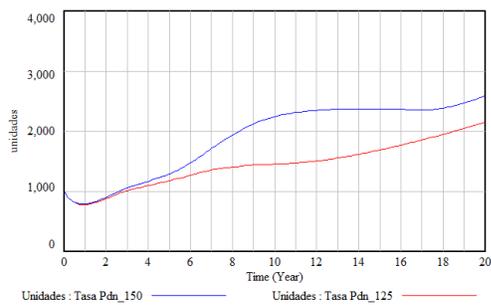


Figura 43. Variable Inventario de productos con estrategia de variación tasa de producción
Fuente: elaboración propia

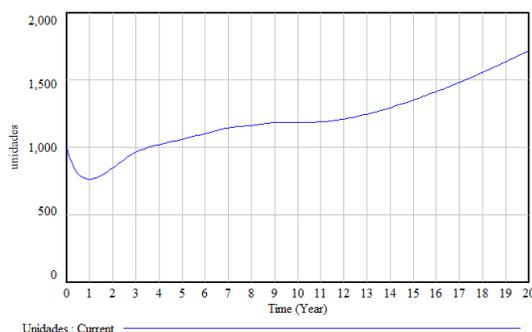


Figura 44. Variable Inventario de productos sin estrategia de variación tasa de producción
Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en la **Figura 45** se observa un comportamiento similar de la variable de costos totales de la organización aplicando la política anterior, es evidente aumento en los costos en la medida que aumenta la capacidad de producción ecológica. Mientras que en la **Figura 46** es evidente el cambio en la tendencia.

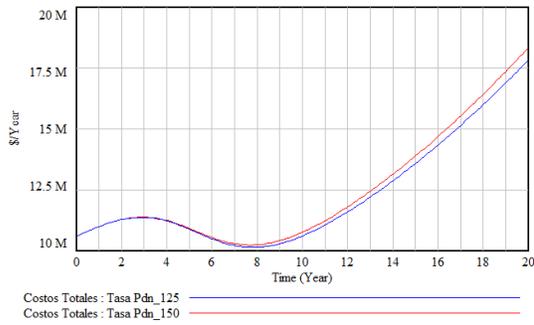


Figura 45. Variable Costos totales con estrategia de variación tasa de producción
Fuente: elaboración propia

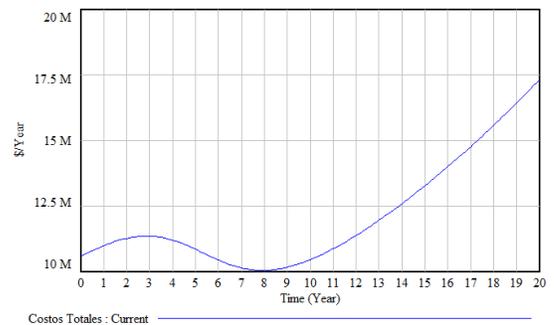


Figura 46. Variable Costos Totales sin política de variación tasa de producción
Fuente: elaboración propia

El llevar a cabo actividades de eco-innovación da lugar a elevar los costos de la organización, como se observa en la **Figura 45**, esto en vista de la inversión en equipos con tecnologías más eficientes, lo que puede ocasionar problemas financieros en la empresa a largo plazo (Ambec & Lanoie, 2008). No obstante, las eco-innovaciones que den respuesta a las regulaciones ambientales, pueden aumentar los beneficios y mejorar la productividad de la organización (Rubashkina, Galeotti, & Verdolini, 2015).

5. Discusión

Los procesos de eco-innovación representan un factor de desarrollo sostenible en las organizaciones del sector manufactura que los implementen, favoreciendo sus resultados operacionales (Kijek, 2013) y la percepción de la compañía por parte de los clientes. Sin embargo, la aplicación de estas innovaciones ecológicas depende de la percepción de los tomadores de decisiones proveniente de los factores externos de la organización (Tsai & Liao, 2017).

Del análisis de las variables del modelo se establece que si se generan mayores inversiones en equipos o tecnologías amigables con el medio ambiente aumenta la capacidad instalada de los mismos, generando una mayor adopción tecnológica. Sin embargo, se evidencia un retardo entre las etapas de inversión y aumento de la capacidad instalada, y entre ésta última y la adopción tecnológica. Asimismo, la adopción de tecnologías ecológicas permite aumentar la eficiencia en los procesos productivos, mejorando la capacidad de recuperación de desechos, y, por consiguiente, disminuyendo la generación de éstos. Al existir una mejora en la eficiencia de los procesos se disminuye el consumo de energía y de materia prima, lo cual se ve traducido en una mejora en los costos de operación (Ryszko, 2015) y el rendimiento financiero de la organización (Hojnik et al., 2017). La demanda del mercado presiona a las compañías a realizar innovaciones en sus productos, debido a la consciencia ambiental que éstos han adquirido. Pero, innovar en productos trae consigo beneficios para la organización y es la mejora en la imagen corporativa (Ryszko, 2015; Segarra et al., 2015) y el aumento de los ingresos, lo cual, a su vez, mejora el rendimiento financiero, permitiendo de esta manera, poder generar mayores inversiones en capital humano, facultando a la firma de personal capacitado para adoptar mejor la tecnología y garantizar eficiencia en el trabajo (Rashid et al., 2015), pero se debe tener en cuenta que en esta etapa se presenta un retardo, debido a los conocimientos y habilidades que el personal debe adquirir antes de adoptar la nueva tecnología.

Para los procesos de creación de estrategias las organizaciones normalmente tienen en cuenta análisis de datos de mercado, planeación de desarrollo de nuevos productos, gestión de inversiones, entre otros factores. En el caso de la adopción de nuevas estrategias de eco-innovación estas pueden dar como resultado diferentes tipos de eco-innovaciones (de productos, procesos u organizacionales) y posteriormente conducir a diferentes niveles de desempeño. Por lo cual, es importante implementar estrategias adecuadas y que se ajusten a los objetivos de la organización (He et al., 2018), tales como las inversiones continuas en actividades de I+D+i y de capacitación de empleados, ya que estas son sustanciales para el desarrollo de la eco-innovación (Horbach, 2008). Esto puede incluir conocimientos en la cadena de suministro verde y mejora en los procesos operacionales y de

producción más sostenible, y en el desarrollo de las capacidades de la misma organización para llevar a cabo prácticas relacionadas con la eco-innovación; crear conciencia ambiental, aprender a usar herramientas o métodos para crear competencias respetuosas con el medio ambiente (He et al., 2018).

5.1 Conclusiones

Se identificaron y seleccionaron las variables más representativas que intervienen en los procesos de eco-innovación, a través de una validación con personas expertas en esta temática, obteniendo como resultado las variables que se emplearon en el modelo de simulación. De esta manera se destacan por parte del personal experto las variables de ahorro en el consumo de energía, los impactos ambientales que las actividades industriales generan, las regulaciones estatales, la eficiencia de los equipos y las emisiones de gases contaminantes.

A partir de las variables definidas se diseñó un modelo computacional que representará las dinámicas de eco-innovación. El modelo aquí simulado generó la dinámica del sistema como consecuencias de las variables endógenas operacionales de una organización y proporciona una herramienta experimental para la planificación. Además, permite probar y mostrar decisiones relacionadas con la implementación de procesos de eco-innovación al interior de una empresa.

Se planteó la formulación de estrategias enfocadas en la implementación de procesos de eco-innovación. Como resultado de ello, se generaron tres estrategias, que en su proceso de simulación se evidenció la importancia de la contratación de personal capacitado, ya que esto facilita la implementación de eco-productos y eco-procesos en la organización. Asimismo, permite la gestión de la cadena de suministro de manera eficiente. Del mismo modo, el uso de materia prima con propiedades más eficientes, ya que se generan menos desperdicios en el proceso de producción, generando más unidades de producción.

El modelo aquí planteado se puede emplear para analizar varias estrategias respondiendo a la pregunta básica «qué pasa si...», identificando estrategias eficientes en el proceso y respondiendo a preguntas acerca de los resultados de las decisiones que se toman a largo plazo sobre la implementación de procesos sostenibles en una organización. El modelo propuesto permitió analizar y estudiar las dinámicas del proceso de producción de una organización del sector manufactura, posibilitando la modificación de variables, con el propósito de simular decisiones y disminuir el grado de incertidumbre. Si bien los procesos de simulación no son 100 % confiables, por lo que son resultados de la manipulación de variables y parámetros por los individuos que los diseñan, sí logran recrear sistemas o condiciones reales, complejas y no lineales dentro de una organización, y que al

manipular variables se puede lograr disminuir de manera considerable la incertidumbre que las decisiones generan en los procesos.

Se evidencia la importancia de las estrategias evaluadas para mejorar el rendimiento de la organización, respondiendo con ello la pregunta de investigación planteada en la parte inicial del proyecto de investigación.

Con este trabajo de investigación se evidencia la importancia de los procesos de eco-innovación en las organizaciones del sector manufactura, y en la sociedad en general, como una alternativa para mitigar los impactos ambientales causados a lo largo del tiempo por la actividad humana y ofrecer productos respetuosos con el medio ambiente. Sin desconocer las posibilidades que obtienen las compañías de optimizar sus procesos, haciéndolos más eficientes y generando beneficios económicos y corporativos.

Se empleó la DS como método para estructurar un problema actual y de gran importancia, no solo del sector industrial, sino de otros sectores que están contribuyendo a la degradación del medio ambiente. Por consiguiente, los resultados de la presente investigación sirven como base para futuros trabajos sobre la implementación de procesos sostenibles en organizaciones del sector manufacturero. Permitiendo generar conocimiento sobre cómo se analiza este enfoque en ambientes dinámicos, obteniendo una comprensión más profunda del sistema para comunicarlo a las partes interesadas, ya que los seres humanos carecemos de la capacidad cognitiva para inferir comportamientos dinámicos consecuentes sin ayuda.

5.2 Recomendaciones

Se propone aplicar el modelo genérico aquí desarrollado en un caso real que permita hacer validaciones en campo, ajustando de esta manera el modelo y corroborar o refutar los resultados de dicho modelo. Lo que permitiría, de manera empírica, mostrar resultados confiables de las posibles estrategias o toma de decisiones que diariamente los gerentes de las organizaciones realizan.

Una posible alternativa para que las organizaciones del sector manufactura sigan el camino hacia la sostenibilidad es el uso de iniciativas de colaboración que les permita adquirir conocimientos fuera de la misma y la creación de redes de innovación. Las redes podrían ser una opción potencial para que las empresas participen en procesos de innovación ecológica. Por lo que la aplicación de modelos de innovación abierta desarrolla ideas de interés social, lo cual reducen los costos de introducción de tecnologías o productos innovadores, ya que es posible acceder a cualquier tipo de información externa que también se convierte en un determinante relevante para la implementación de eco-innovaciones en las organizaciones.

Las acciones relacionadas con la incorporación de un sistema de gestión ambiental pueden, de igual manera, contribuir en otras medidas a la eco-innovación en toda la organización, de igual manera, muestran las influencias positivas de las herramientas de gestión ambiental. Asimismo, el cumplimiento de la normativa ambiental permite a las organizaciones ser más conscientes de la contaminación y los riesgos ambientales producto sus actividades industriales.

En cuanto a la introducción de innovaciones tecnológicas que permitan ser más sostenibles a las organizaciones del sector manufactura, se requieren esfuerzos de los departamentos o responsables de los procesos de I+D+i, ya que ello permite el desarrollo de la capacidad tecnológica al interior de la empresa, desarrollando así patentes ambientales, las cuales influyen en el rendimiento de la firma.

El modelo aquí planteado se diseñó para analizar el comportamiento de un solo producto, por lo que sería interesante estudiar la dinámica de varias líneas de producción y analizar el comportamiento del modelo en la concepción, diseño, producción y distribución de productos ecológicos demandados por el mercado, analizando su ciclo de vida. De igual manera, relacionado con lo anterior, otra opción de trabajo futuro es la reconfiguración del modelo, de tal manera que permita medir las emisiones de GEI de la actividad industrial de las organizaciones y tener mayor información sobre los impactos que esta genera al medio ambiente, permitiendo la medición de la percepción que tienen los clientes de la empresa (imagen corporativa).

Por otro lado, una alternativa es volver el modelo cualitativo diseñado en un modelo probabilístico que analice, por ejemplo, la oscilación de la demanda de productos y validar el comportamiento de adquisición de productos, verificando qué tan atractivos resultan ser estos en el mercado.

Incluso, teniendo en cuenta que la investigación se centró en el sector manufacturero, otros sectores como el de servicios también puede beneficiarse de este modelo, debido a su amplia aplicabilidad, ya que este sector, como otros, están teniendo presiones por parte de los grupos de interés para ser más sostenibles.

A. Anexo: Formulario de validación de expertos

Prioritization of variables for the design of a systems dynamics model

For the implementation of eco-innovation processes in an organization, there are a series of determinants that promote or avoid the adoption of said processes. Conducting a review of the literature on studies of drivers that promote sustainable processes in an organization, it is evident that there are both endogenous and exogenous reasons that affect its implementation.

*Obligatorio

What is the level of importance for you of the following variables or determinants for the implementation of eco-innovation processes in an organization? *

	It's not important	Less important	Important	Very important
Cost of investment in new technology	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Raw material costs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energy saving	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Equipment efficiency	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energy consumption	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Demand for sustainable products	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Environmental impacts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Corporate image	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualified personnel in eco-innovation processes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Emissions of polluting gases	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Amount of material recovered	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Consumption of raw material	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
State Regulations	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Size of the company	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

C. Anexo: Diagrama de niveles y flujos del sistema completo

Bibliografía

- Agarwal, C., Green, G. M., Grove, J. M., Evans, T. P., & Schweik, C. M. (2002). A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice. *Apollo The International Magazine Of Art And Antiques*, 62.
<https://doi.org/10.1289/ehp.6514>
- Aggarwal, R., & Ranganathan, P. (2017). Common pitfalls in statistical analysis: Linear regression analysis. *Perspectives in Clinical Research*, 8(2), 100. <https://doi.org/10.4103/2229-3485.203040>
- Aguirre, J., & Ramírez, M. (2014). *Análisis cuantitativo de modelación y simulación de Sistemas de innovación*. (Instituto Tecnológico Metropolitano, Ed.). Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano. <https://doi.org/10.22430/9789588743615>
- Allwood, J. ., Laursen, S. ., Russell, S. ., de Rodríguez, C. M., & Bocken, N. M. . (2008). An approach to scenario analysis of the sustainability of an industrial sector applied to clothing and textiles in the UK. *Journal of Cleaner Production*, 16(12), 1234–1246.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.06.014>
- Aloise, P. G., & Macke, J. (2017). Eco-innovations in developing countries: The case of Manaus Free Trade Zone (Brazil). *Journal of Cleaner Production*, 168, 30–38.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.212>
- Ambec, S., & Lanoie, P. (2008). Does It Pay to Be Green ? A Systematic Overview. *Academy of Management*, 22, 45–63. <https://doi.org/10.5465/amp.2008.35590353>
- Ansari, N., & Seifi, A. (2013). A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO2emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios. *Energy Policy*, 58, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.042>
- Arcila, J., & Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza Editorial. Retrieved from <http://tiesmexico.cals.cornell.edu/courses/shortcourse5/minisite/pdf/Literatura/AracilGordilloDS.pdf>
- Arundel, A., & Kemp, R. (2009). Measuring eco-innovation. *Evaluation*, 49(89), 1–40.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System*

- Dynamics Review*, 3(12), 183–210.
- Bartoszczuk, P. (2015). Environmental and energy informatics: Polish approaches in eco-innovation. *Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings - Series of the Gesellschaft Fur Informatik (GI)*, 246, 397–407. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018348100&partnerID=40&md5=463f35491bf47518612bce0487f77a3b>
- Bass, F. M. (1969). A new product growth model for consumer durables. *Management Science*, 15(5), 215–227. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/2628128>
- Belin, J., Horbach, J., & Oltra, V. (2011). Determinants and Specificities of Eco-innovations – An Econometric Analysis for the French and German Industry based on the Community Innovation Survey n ° 2011-17, 33(August), 1–22.
- Beltrán-Esteve, M., & Picazo-Tadeo, A. J. (2015). Assessing environmental performance trends in the transport industry: Eco-innovation or catching-up? *Energy Economics*, 51, 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.018>
- Benner, M. J., & Tushman, M. (2003). Exploitation, Exploration and Process Management: the Productivity Dilemma Revisited. *Academy of Management Review*, 28(2), 238–256. <https://doi.org/10.5465/AMR.2003.9416096>
- Bleischwitz, R., Giljum, S., Kuhndt, M., & Schmidt-Bleek, F. (2009). *Eco-innovation – putting the EU on the path to a resource and energy efficient economy*. Retrieved from seri.at/wp-content/.../06/European-Parliament-2009-EcoInnovation.pdf
- Borghesi, S., Cainelli, G., & Mazzanti, M. (2012). European Emission Trading Scheme and environmental innovation: an empirical analysis using CIS data for Italy. *Giornale Degli Economisti*, 71(1), 71–97. Retrieved from http://ideas.repec.org/a/gde/journal/gde_v71_n1_p71-97.html
- Brunnermeier, S. B., & Cohen, M. A. (2003). Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45(2), 278–293. [https://doi.org/10.1016/S0095-0696\(02\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0095-0696(02)00058-X)
- Cai, W., & Li, G. (2018). The drivers of eco-innovation and its impact on performance: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 176, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.109>
- Cainelli, G., De Marchi, V., & Grandinetti, R. (2015). Does the development of environmental innovation require different resources? Evidence from Spanish manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, 94, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.008>

- Cheng, C. C. J., Yang, C. L., & Sheu, C. (2014). The link between eco-innovation and business performance: A Taiwanese industry context. *Journal of Cleaner Production*, *64*, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.050>
- Cheng, C. C., & Shiu, E. C. (2012). Validation of a proposed instrument for measuring eco-innovation: An implementation perspective. *Technovation*, *32*(6), 329–344. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2012.02.001>
- Cuerva, M. C., Triguero-Cano, Á., & Córcoles, D. (2014). Drivers of green and non-green innovation: Empirical evidence in Low-Tech SMEs. *Journal of Cleaner Production*, *68*, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.049>
- Cunico, E., Cirani, C. B. S., Lopes, E. L., & Jabbour, C. J. C. (2017). Eco-innovation and technological cooperation in cassava processing companies: structural equation modeling. *Revista de Administração*, *52*(1), 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.rausp.2016.09.006>
- Das, D., & Dutta, P. (2013). A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy. *Computers and Industrial Engineering*, *66*(4), 720–733. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.016>
- Davidescu, A. A., Vass Paul, Maria, A., Gogonea, R., & Zaharia, M. (2015). Evaluating Romanian Eco-Innovation Performances in European Context, 12723–12757. <https://doi.org/10.3390/su70912723>
- de Oliveira Brasil, M. V., Sá de Abreu, M. C., Lázaro da Silva Filho, J. C., & Leocádio, A. L. (2016). Relationship between eco-innovations and the impact on business. *Revista de Administracao*, *51*, 276–287. <https://doi.org/http://dx.doi.Org/10.1016/j.rausp.2016.06.003>
- Del Río, P., Peñasco, C., & Romero, D. (2016). What drives eco-innovators? A critical review of the empirical literature based on econometric methods.pdf. *Journal of Cleaner Production*, 2158–2170.
- del Río, P., Romero, D., & Peñasco, C. (2017). Analysing firm-specific and type-specific determinants of eco-innovation. *Technological and Economic Development of Economy*, *23*(2), 270–295. <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1072749>
- Desmarchelier, B., Djellal, F., & Gallouj, F. (2013). Environmental policies and eco-innovations by service firms: An agent-based model. *Technological Forecasting and Social Change*, *80*(7), 1395–1408. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.11.005>
- Dhull, S., & Narwal, M. S. (2016). Drivers and barriers in green supply chain management adaptation: A state-of-art review. *Uncertain Supply Chain Management*, *4*(July 2006), 61–76. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2015.7.003>

- Dias, M. A. de P., Vianna, J. N. de S., & Felby, C. (2016). Sustainability in the prospective scenarios methods: A case study of scenarios for biodiesel industry in Brazil, for 2030. *Futures*, 82, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.06.005>
- Díaz-García, C., González-Moreno, Á., & Sáez-Martínez, F. J. (2015). Eco-innovation: Insights from a literature review. *Innovation: Management, Policy and Practice*, 17(1), 6–23. <https://doi.org/10.1080/14479338.2015.1011060>
- Forester, J. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review*, 10(2), 245–256. <https://doi.org/10.1002/sdr.4260100211>
- Freire, P. (2018). Enhancing innovation through behavioral stimulation: The use of behavioral determinants of innovation in the implementation of eco-innovation processes in industrial sectors and companies. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1677–1687. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.027>
- Frondel, M., Horbach, J., & Rennings, K. (2007). End-of-pipe or cleaner production An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries. *Business Strategy and the Environment*, 16(8), 571–584. <https://doi.org/10.1002/bse.496>
- Fussler, C., & James, P. (1999). *Eco-innovación: integrando el medio ambiente en la empresa del futuro*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Georgiadis, P. (2013). An integrated system dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 32, 116–137. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.11.009>
- Georgiadis, P., & Michaloudis, C. (2012). Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.022>
- Godet, M. (2000). *La caja de herramientas de la prospectiva estratégica*.
- González-Busto, B. (1998). La Dinámica de Sistemas como Metodología para la elaboración de Modelos de Simulación, 41. Retrieved from www.gestipolis.com/.../metodologiadinamica.htm
- González, B., & Múgica, B. (1998). *La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación*. Universidad de Oviedo.
- Granda-Orive, J. I., Alonso-Arroyo, A., García-Río, F., Solano-Reina, S., Jiménez-Ruiz, C. A., & Aleixandre-Benavent, R. (2013). Ciertas ventajas de Scopus sobre Web of Science en un análisis bibliométrico sobre tabaquismo. *Revista Española de Documentación Científica*, 36(2), 9. <https://doi.org/10.3989/redc.2013.2.941>

- He, F., Miao, X., Wong, C. W. Y., & Lee, S. (2018). Contemporary corporate eco-innovation research: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 502–526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.314>
- Hojnik, J., Ruzzier, M., & Manolova, T. (2017). Eco-Innovation and Firm Efficiency: Empirical Evidence from Slovenia. *Foresight and STI Governance*, *11*(3), 103–111. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2017.3.103.111>
- Hond, F. Den, & Groenewegen, P. (1996). Environmental technology foresight: New horizons for technology management. *Technology Analysis & Strategic Management*, *8*(1), 33–46. <https://doi.org/10.1080/09537329608524231>
- Horbach, J. (2008). Determinants of environmental innovation—New evidence from german panel data source.pdf. *Research Policy*, 163–173.
- Huber, J. (2008). Technological environmental innovations (TEIs) in a chain-analytical and life-cycle-analytical perspective. *Journal of Cleaner Production*, *16*(18), 1980–1986. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.014>
- Hur, T., Lee, J., Ryu, J., & Kwon, E. (2005). Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of Environmental Management*, *75*(3), 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.014>
- Izquierdo, L., Galán, J., Santos, J., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Red Científica*, *20*(1), 46–66. <https://doi.org/2017-01-18>
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Revista de Metodología de Las Ciencias Sociales*, 85–112.
- Jo, J. H., Roh, T. W., Kim, S., Youn, Y. C., Park, M. S., Han, K. J., & Jang, E. K. (2015). Eco-Innovation for sustainability: Evidence from 49 countries in Asia and Europe. *Sustainability (Switzerland)*, *7*(12), 16820–16835. <https://doi.org/10.3390/su71215849>
- Kammerer, D. (2009). The effects of customer benefit and regulation on environmental product innovation. Empirical evidence from appliance manufacturers in Germany. *Ecological Economics*, *68*(8–9), 2285–2295. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.02.016>
- Kazemi, A., & Hosseinzadeh, M. (2016). Policy Analysis of Greenhouse Gases ' Mitigation in Iran Energy Sector Using System Dynamics Approach. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, *00*(00), 1–10. <https://doi.org/10.1002/ep>
- Kijek, T. (2013). External conditions influencing the implementation of eco-innovations in

- European enterprises. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 15(1), 659–670. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84889816758&partnerID=40&md5=280ab5997372349de789fd5f82207029>
- Kijek, T., & Kasztelan, A. (2013). Eco-innovation as a Factor of Sustainable Development Ekoinnowacje jako czynnik zrównoważon ego rozwoju, 8(2), 103–112. Retrieved from <https://poseidon01.ssrn.com/delivery.php?ID=1831101240861230961041020830270960870210710170880690850300230811110991191020060841220000160170620060980610840150011271240051180610070420400060240011250800821201070870300120340930861051060790131130860250890221050>
- Klewitz, J., Zeyen, A., & Hansen, E. G. (2012). Intermediaries driving eco-innovation in SMEs: a qualitative investigation. *European Journal of Innovation Management*, 15(4), 442–467. <https://doi.org/10.1108/14601061211272376>
- Kobayashi, H. (2006). A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning. *Advanced Engineering Informatics*, 20(2), 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.11.002>
- Kong, T., Feng, T., & Ye, C. (2016). Advanced manufacturing technologies and green innovation: The role of internal environmental collaboration. *Sustainability (Switzerland)*, 8(10), 9–11. <https://doi.org/10.3390/su8101056>
- Kumar, A., Shankar, R., & Momaya, K. S. (2015). The Bass Diffusion Model does not explain diffusion. *System Dynamic Review*. Retrieved from <https://www.systemdynamics.org/assets/conferences/2015/proceed/papers/P1233.pdf>
- Manzano, A. (2000). Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales, 7, 67–72.
- Müller, M. O., Kaufmann-Hayoz, R., Schwaninger, M., & Ulli-Ber, S. (2013). The diffusion of eco-technologies: A model-based theory. *Understanding Complex Systems*, 49–67. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8606-0-4>
- Naill, R. F. (1992). system dynamics model for national energy policy planning. *System Dynamic Review*, 8(1), 1–19. <https://doi.org/10.1002/sdr.4260080102>
- Nieto-Romero, M., Milcu, A., Leventon, J., Mikulcak, F., & Fischer, J. (2016). The role of scenarios in fostering collective action for sustainable development: Lessons from central Romania. *Land Use Policy*, 50, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.013>
- Nieto, L. (2015). Análisis Multivariado. *Diplomado En Estadística Aplicada*, 1–35.
- Ociepa, A., & Pachura, P. (2017). Eco-innovations in the functioning of companies. *Environmental Research*, 156(February), 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.027>

- Organisation for Economic Cooperation and Development. (2009). Sustainable Manufacturing and Eco-Innovation: Framework, Practices and Measurement. *Oecd*, 38.
<https://doi.org/10.1177/0022146512457153>
- Pacheco, D., Caten, C., Jung, C., Ribeiro, J., Navas, H., & Cruz-Machado, V. (2017). Eco-innovation determinants in manufacturing SMEs: Systematic review and research directions. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2277–2287.
<https://doi.org/http://dx.doi.Org/10.1016/j.jclepro.2016.11.049>
- Pacheco, D., ten Caten, C. S., Jung, C. F., Ribeiro, J. L. D., Navas, H. V. G., & Cruz, V. A. (2017). Eco-innovation determinants in manufacturing SMEs: Systematic review and research directions. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2277–2287.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.049>
- Pidd, M. (1999). Just modeling through: A rough guide to modeling. *Interfaces*, 29(2), 118–132.
<https://doi.org/10.1287/inte.29.2.118>
- Poles, R. (2013). System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies. *International Journal of Production Economics*, 144(1), 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.003>
- Portillo-tarragona, P., Scarpellini, S., Moneva, J., Valero, J., & Aranda-usón, A. (2018). Classification and Measurement of the Firms ' Resources and Capabilities Applied to Eco-Innovation Projects from a Resource-Based View Perspective. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3161), 23. <https://doi.org/10.3390/su10093161>
- Pujari, D. (2006). Eco-innovation and new product development: Understanding the influences on market performance. *Technovation*, 26(1), 76–85.
<https://doi.org/10.1016/j.technovation.2004.07.006>
- Rai, V., & Robinson, S. A. (2015). Agent-based modeling of energy technology adoption: Empirical integration of social, behavioral, economic, and environmental factors. *Environmental Modelling and Software*, 70, 163–177.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.04.014>
- Rashid, N., Jabar, J., Yahya, S., & Shami, S. (2015). Dynamic eco innovation practices: A systematic review of state of the art and future direction for eco innovation study. *Asian Social Science*, 11(1), 8–21. <https://doi.org/10.5539/ass.v11n1p8>
- Rehfeld, K. M., Rennings, K., & Ziegler, A. (2007). Integrated product policy and environmental product innovations: An empirical analysis. *Ecological Economics*, 61(1), 91–100.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.02.003>

- Rennings, K. (2000). Redefining innovation - Eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 32(2), 319–332. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00112-3)
- Rodas, J. F. (2015). Análisis de Métodos de Optimización Metaheurística para la Calibración de Modelos en Dinámica de Sistemas.
- Rovira, S., Patiño, J., & Schaper, M. (2017). *Ecoinnovación y producción verde: una revisión sobre las políticas de América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*.
- Rubashkina, Y., Galeotti, M., & Verdolini, E. (2015). Environmental regulation and competitiveness : Empirical evidence on the Porter Hypothesis from European manufacturing sectors. *Energy Policy*, 83, 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.014>
- Russo, D., Regazzoni, D., & Montecchi, T. (2011). Eco-design with TRIZ laws of evolution. *Procedia Engineering*, 9, 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.121>
- Russo, D., Rizzi, C., & Montelisciani, G. (2014). Inventive guidelines for a TRIZ-based eco-design matrix. *Journal of Cleaner Production*, 76, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.057>
- Russo, D., Schöfer, M., & Bersano, G. (2015). Supporting ECO-innovation in SMEs by TRIZ Eco-guidelines. *Procedia Engineering*, 131, 831–839. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.388>
- Rydzak, F., & Chlebus, E. (2007). Application of Resilience Analysis in Production Systems – Bombardier Transportation Case Study. *Proceedings of the 2007 International Conference of the System Dynamics Society*, 1–18.
- Ryszko, A. (2015). Drivers and barriers to the implementation of eco-innovation in the steel and metal industry in Poland. *Metal*, (May 2014).
- Ryszko, A. (2016). Proactive environmental strategy, technological eco-innovation and firm performance-case of Poland. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020156>
- Saritas, O., & Aylen, J. (2010). Using scenarios for roadmapping: The case of clean production. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.03.003>
- Scarpellini, S., Aranda-Usón, J., Marco-Fondevila, M., Aranda-Usón, A., & Llera-Sastresa, E. (2015). Eco-innovation indicators for sustainable development: the role of the technology institutes. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 10(1), 40–56.

- <https://doi.org/10.1504/IJISD.2016.073415>
- Scarpellini, S., Valero, A., Llera, E., & Aranda, A. (2013). Multicriteria analysis for the assessment of energy innovations in the transport sector. *Energy*, *57*, 160–168.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.004>
- Scarpellini, S., Valero, J., & Portillo, P. (2016). The “economic-finance interface” for eco-innovation projects. *International Journal of Project Management*, *34*(6), 1012–1025.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.04.005>
- Schwarz, N., & Ernst, A. (2009). Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations - An empirical approach. *Technological Forecasting and Social Change*, *76*(4), 497–511. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.03.024>
- Segarra, M., Peiró, A., & Cervelló, R. (2015). Determinantes de la eco-innovación en la actividad de construcción en España. *Informes de La Construcción*, *67*(537), e068.
<https://doi.org/10.3989/ic.13.124>
- Sezen, B., & Çankaya, S. Y. (2013). Effects of Green Manufacturing and Eco-innovation on Sustainability Performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *99*, 154–163.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.481>
- Shih, Y., & Tseng, C. (2014). Cost-benefit analysis of sustainable energy development using life-cycle co-benefits assessment and the system dynamics approach. *Applied Energy*, *119*, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.031>
- Stoycheva, S., Marchese, D., Paul, C., Padoan, S., Juhmani, A., & Linkov, I. (2018). Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, *187*, 257–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.133>
- Sun, E., & Park, S. (2017). The Relationship Between Chaebol And Firm Value Using Bayesian Network, *33*(6), 1113–1128.
- Tao, J., Li, L., Yu, S., Li, L., & Yu, S. (2018). An innovative eco-design approach based on integration of LCA, CAD\CAE and optimization. *Journal of Cleaner Production*, *187*.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.213>
- Tian, Y., Govindan, K., & Zhu, Q. (2014). A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, *80*, 96–105.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.076>
- Timma, L., Bariss, U., Blumberga, A., & Blumberga, D. (2015). Outlining Innovation Diffusion Processes in Households Using System Dynamics. Case Study: Energy Efficiency Lighting.

- Energy Procedia*, 75, 2859–2864. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.574>
- Torres-Rivera, A. D., & Cuevas-Zúñiga, I. Y. (2012). Propuesta de tratamiento contable de las eco-eficiencias. *Revista Del Instituto Internacional de Costos*, 187–210.
- Triguero, A., Moreno, L., & Davia, M. (2013). Drivers of different types of eco-innovation in European SMEs.pdf, 25–33.
- Tsai, K. H., & Liao, Y. C. (2017). Innovation Capacity and the Implementation of Eco-innovation: Toward a Contingency Perspective. *Business Strategy and the Environment*, 26(7), 1000–1013. <https://doi.org/10.1002/bse.1963>
- Tyl, B., Legardeur, J., Millet, D., & Vallet, F. (2013). Adaptation of the creativity tool ASIT to support eco-ideation phases. In *Sustainable Intelligent Manufacturing International Conference*. Libon, Portugal. <https://doi.org/10.1201 / b15002-85>
- Umeda, Y., Takata, S., Kimura, F., Tomiyama, T., Sutherland, J. W., Kara, S., ... Duflou, J. R. (2012). Toward integrated product and process life cycle planning - An environmental perspective. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 681–702. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.004>
- Valero, J., Scarpellini, S., Garcés, C., & Rivera, P. (2017). Environment and innovation in Spanish business: Bridging the gap between academics and practitioners. *Universia Business Review*, 2017(54), 90–109. <https://doi.org/10.3232/UBR.2017.V14.N2.03>
- Vergara, J. C., Fontalvo, T. J., & Maza, F. (2010). La planeación por escenarios : Revisión de conceptos y propuestas metodológicas. *Prospect*, Vol.8(No.2), 21–29. Retrieved from <http://altekio.es/wordpress/wp-content/uploads/2013/12/Dialnet-LaPlaneacionPorEscenariosRevisionDeConceptosYPropu-3634575.pdf>
- Vlachos, D., Georgiadis, P., & Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers and Operations Research*, 34(2), 367–394. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.005>
- Watróbski, J. (2016). Outline of Multicriteria Decision-making in Green Logistics. *Transportation Research Procedia*, 16(March), 537–552. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.051>
- WCED. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. *United Nations Commission*, 4(1), 300. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Yan, W., Cui, Z., & Gil, M. J. Á. (2016). Assessing the impact of environmental innovation in the airline industry: An empirical study of emerging market economies. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 21, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.04.001>

- Yang, C. J., & Chen, J. L. (2011). Accelerating preliminary eco-innovation design for products that integrates case-based reasoning and TRIZ method. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 998–1006. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.014>
- Yang, C. J., & Chen, J. L. (2012). Forecasting the design of eco-products by integrating TRIZ evolution patterns with CBR and Simple LCA methods. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2884–2892. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.150>