



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CONTABILIDAD Y AUDITORÍA
CARRERA DE ECONOMÍA

Proyecto de Investigación, previo a la obtención del Título de Economista.

Tema:

“Modelo matemático de optimización basado en los objetivos ambientales para la industria de manufactura del Ecuador.”

Autora: Vaca Calero, Lisbeth Solange

Tutor: Ing. Aldás Salazar, Darwin Santiago

Ambato - Ecuador

2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Darwin Santiago Aldás Salazar, con cédula de ciudadanía No. 180394776-9, en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación sobre el tema: **“MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN LOS OBJETIVOS AMBIENTALES PARA LA INDUSTRIA MANUFACTURERA DEL ECUADOR”**, desarrollado por Lisbeth Solange Vaca Calero, de la Carrera de Economía, modalidad presencial, considero que dicho informe investigativo reúne los requisitos, tanto técnicos como científicos y corresponde a las normas establecidas en el Reglamento de Graduación de Pregrado, de la Universidad Técnica de Ambato y en el normativo para presentación de Trabajos de Graduación de la Facultad de Contabilidad y Auditoría.

Por lo tanto, autorizo la presentación del mismo ante el organismo pertinente, para que sea sometido a evaluación por los profesores calificadores designados por el H. Consejo Directivo de la Facultad.

Ambato, Febrero 2024

TUTOR



.....
Ing. Darwin Santiago Aldás Salazar Mg.

C.C. 180394776-9

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Lisbeth Solange Vaca Calero con cédula de ciudadanía No. 185004544-2, tengo a bien indicar que los criterios emitidos en el proyecto de investigación, bajo el tema: **“MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN LOS OBJETIVOS AMBIENTALES PARA LA INDUSTRIA MANUFACTURERA DEL ECUADOR”**, así como también los contenidos presentados, ideas, análisis, síntesis de datos, conclusiones, son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autora de este Proyecto de Investigación.

Ambato, Febrero 2024

AUTORA



.....
Lisbeth Solange Vaca Calero

C.C. 185004544-2

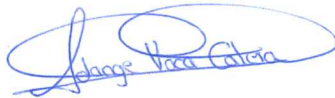
CESIÓN DE DERECHOS

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este proyecto de investigación, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi proyecto de investigación, con fines de difusión pública; además, apruebo la reproducción de este proyecto de investigación, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica potencial; y se realice respetando mis derechos de autora.

Ambato, Febrero 2024

AUTORA



.....
Lisbeth Solange Vaca Calero

C.C. 185004544-2

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

El Tribunal de Grado, aprueba el proyecto de investigación, sobre el tema: **“MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN LOS OBJETIVOS AMBIENTALES PARA LA INDUSTRIA MANUFACTURERA DEL ECUADOR”**, elaborado por Lisbeth Solange Vaca Calero, estudiante de la Carrera de Economía, el mismo que guarda conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por la Facultad de Contabilidad y Auditoría de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Febrero 2024

Dra. Tatiana Valle Ph. D.
PRESIDENTE

Econ. Geovanny Carrion

MIEMBRO CALIFICADOR

Econ. Nelson Lascano

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

*Este proyecto
investigación está
dedicado para mí;
quien a pesar de
todas las
adversidades ha
podido seguir
adelante. También
está dedicada a mi
papá Germán y a mi
mamá Isabel; y a mis
hermanos quienes
siempre han sido mi
principal fuente de
motivación.*

*Gracias por su apoyo
incondicional que me ha
permitido alcanzar mis
metas.*

AGRADECIMIENTO

Primero que nada, agradezco a Dios por darme la vida y sobre todo por permitirme seguir mi sueño de estudiar en la universidad que siempre ha sido mi sueño.

También agradezco a la Universidad Técnica de Ambato por abrirme sus puertas y poder formarme profesionalmente. Un inmenso agradecimiento a mis padres quienes me han apoyado a lo largo de mi formación educativa.

Solange Vaca Calero

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PÁGINA
A. PÁGINAS PRELIMINARES	
PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	iii
CESIÓN DE DERECHOS	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xiv
ABSTRACT.....	xv
B. CONTENIDOS	
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación.....	4
1.2.1 Justificación teórica, metodológica (viabilidad) y práctica	4
1.2.2. Formulación del problema de investigación	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos	6

CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Revisión de literatura.....	7
2.1.1 Antecedentes investigativos.....	7
2.1.2 Fundamentos teóricos	10
2.2. Hipótesis (opcional) y/o preguntas de investigación.....	19
CAPÍTULO III.....	21
METODOLOGÍA	21
3.1 Recolección de la información	21
3.1.1 Población	21
3.1.3 Técnicas e instrumentos.....	21
3.2 Tratamiento de la información	22
3.2.1 Revisión de la literatura	23
3.2.3 Análisis multicriterio	28
3.3 Operacionalización de las variables.....	33
3.3.1 Modelo matemático de optimización.....	33
3.3.2 Objetivos ambientales.....	34
CAPÍTULO IV	37
RESULTADOS.....	37
4.1 Resultados y discusión.....	37
4.1.1 Revisión de la literatura	37
4.1.2 Análisis multicriterio	58
4.1.3 Análisis multicriterio	108
4.2 Fundamentación de las preguntas de investigación	112
CAPÍTULO V.....	119
CONCLUSIONES.....	119
5.1 Conclusiones	119

5.2 Limitaciones del estudio.....	119
5.3 Futuras temáticas de investigación.....	120
C. MATERIAL DE REFERENCIA	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXOS	142

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	PÁGINA
Tabla 1 Métodos de programación lineal.....	16
Tabla 2 Métodos de optimización	17
Tabla 3 Escala de Medidas de Saaty	30
Tabla 4 Ecuación booleana	37
Tabla 5 Artículos encontrados	38
Tabla 6 Criterios de modelización	58
Tabla 7 Categorización de los modelos.....	61
Tabla 8 Parámetros de modelización	62
Tabla 9 Parámetros.....	101
Tabla 10 Parámetros desglosados	102
Tabla 11 Suma Normalizada	104
Tabla 12 Normalización por el rango.....	105
Tabla 13 Coeficiente de correlación.....	106
Tabla 14 Método critic	107

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PÁGINA
Figura 1 Diagrama de tratamiento de la información	22
Figura 2 Diagrama de flujo PRISMA	25
Figura 3 Cronología de publicaciones	52
Figura 4 Revistas con mayores artículos publicadas	53
Figura 5 Diagrama de Voswiewer	54
Figura 6 Diagrama de flujo PRISMA	56
Figura 7 Expert Choice	108
Figura 8 Creación de alternativas y parámetros	108
Figura 9 Parámetros y modelos.....	109
Figura 10 Sensibilidad de rendimiento para los parámetros	110
Figura 11 Sensibilidad Dinámica para los nodos inferiores	111
Figura 12 Sensibilidad cara a cara para los nodos inferiores	112

ÍNDICE DE ANEXOS

CONTENIDO	PÁGINA
Anexo 1 Modelización del Modelo-01	142
Anexo 2 Modelización del Modelo-02	145
Anexo 3 Modelización del Modelo-03	147
Anexo 4 Modelización del Modelo-04	150
Anexo 5 Modelización del Modelo-05	152
Anexo 6 Modelización del Modelo-06	154
Anexo 7 Modelización del Modelo-07	156
Anexo 8 Coeficiente de correlación.....	157

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CONTABILIDAD Y AUDITORÍA
CARRERA DE ECONOMÍA

TEMA: “MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN
LOS OBJETIVOS AMBIENTALES PARA LA INDUSTRIA
MANUFACTURERA DEL ECUADOR”

AUTOR: Lisbeth Solange Vaca Calero

TUTOR: Ing. Darwin Santiago Aldás Salazar Mg.

FECHA: Febrero 2024

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo de este proyecto de investigación es seleccionar un modelo matemático de optimización que se ajuste a los objetivos ambientales para la industria manufacturera del Ecuador. Para ello se aplicó un análisis bibliométrico y análisis multicriterio. La presente disertación, intitulada "Modelo matemático de optimización basado en objetivos ambientales para la industria manufacturera del Ecuador", se erige como un aporte significativo en el ámbito de la sostenibilidad industrial, un tema de creciente importancia en el escenario económico y ambiental global. Esta investigación se inscribe en una línea de indagación académica que busca armonizar la eficiencia productiva con la preservación ambiental, un desafío particularmente pertinente para el sector manufacturero ecuatoriano. La metodología implementada en este estudio integrando un análisis bibliométrico con un análisis multicriterio. A través del análisis bibliométrico, se ha procedido a una meticulosa revisión de la literatura existente, identificando tendencias predominantes, lagunas en la investigación actual y enfoques metodológicos relevantes en el campo de la optimización ambiental aplicada. Por otro lado, el análisis multicriterio ha permitido una evaluación a los parámetros de cada modelo, facilitando así la formulación de un modelo matemático adaptado y pertinente. Este modelo busca incorporar de manera integral los objetivos ambientales, proponiendo un paradigma de producción que es simultáneamente eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Los resultados pueden ser útiles ofreciendo una herramienta valiosa para los responsables de la toma de decisiones en el sector manufacturero encaminado hacia un desarrollo industrial sostenible y responsable en el Ecuador.

PALABRAS DESCRIPTORAS: MODELO MATEMÁTICO, OPTIMIZACIÓN, SOSTENIBILIDAD, PROGRAMACIÓN LINEAL, MANUFACTURERA

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO
FACULTY OF ACCOUNTING AND AUDITING
ECONOMICS CAREER

TOPIC: "MATHEMATICAL OPTIMISATION MODEL BASED ON ENVIRONMENTAL OBJECTIVES FOR THE MANUFACTURING INDUSTRY IN ECUADOR".

AUTHOR: Lisbeth Solange Vaca Calero

TUTOR: Ing. Darwin Santiago Aldás Salazar Mg.

DATE: February 2024

ABSTRACT

The objective of this research project is to select a mathematical optimisation model that fits the environmental objectives for the manufacturing industry in Ecuador. For this purpose, a bibliometric analysis and multi-criteria analysis were applied. This dissertation, entitled "Mathematical optimisation model based on environmental objectives for the manufacturing industry in Ecuador", is a significant contribution to the field of industrial sustainability, a topic of growing importance in the global economic and environmental scenario. This research is part of a line of academic research that seeks to harmonise productive efficiency with environmental preservation, a particularly relevant challenge for the Ecuadorian manufacturing sector. The methodology implemented in this study integrates a bibliometric analysis with a multi-criteria analysis. Through the bibliometric analysis, a meticulous review of the existing literature has been carried out, identifying predominant trends, gaps in current research and relevant methodological approaches in the field of applied environmental optimisation. On the other hand, the multi-criteria analysis has allowed an evaluation of the parameters of each model, thus facilitating the formulation of an adapted and relevant mathematical model. On the other hand, multi-criteria analysis has allowed an evaluation of the parameters of each model, thus facilitating the formulation of an adapted and relevant mathematical model. This model seeks to comprehensively incorporate environmental objectives, proposing a production paradigm that is simultaneously efficient and environmentally friendly. The results can be useful in providing a valuable tool for decision-makers in the manufacturing sector towards sustainable and responsible industrial development in Ecuador.

KEYWORDS: MATHEMATICAL MODELLING, OPTIMISATION, SUSTAINABILITY, LINEAR PROGRAMMING, MANUFACTURING

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Los problemas medioambientales en la actualidad son desafíos que se enfrentan en la sociedad, tienen un impacto significativo en el entorno natural y pueden tener consecuencias negativas para la salud humana y la biodiversidad. En este sentido, (Gutiérrez Escajeda et al., 2016) mencionan que el uso de combustibles fósiles como fuente energética es uno de los promotores más importantes del incremento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera y a nivel mundial siguen aumentando las emisiones. Según el informe de la (Organización de las Naciones Unidas, 2022) en el 2022 se alcanzó una cantidad de emisiones de 36,6 gigatoneladas de CO₂. Este año la concentración de CO₂ en la atmósfera ha alcanzado 417.2 partes por millón (ppm) en 2022, más de un 50% por encima de los niveles preindustriales (278 ppm). Las emisiones siguen creciendo y la entidad National Geographic (2023) recalca las consecuencias que lleva el aumento de emisiones como en las grandes zonas heladas, donde se está produciendo el derretimiento de glaciares.

El consumo de energía también contribuye al problema ambiental. A nivel global, el sector industrial se caracteriza por ser uno de los mayores consumidores de recursos energéticos. La organización International Energy Agency (2022) menciona que, en la última década, el consumo final mundial de energía del sector fue en promedio 30%. Asimismo, la compañía Energy Data, (2023) señala que la intensidad de consumo energético mundial mejoró ligeramente en 2022 (-1,2 %), pero sigue siendo inferior a la media de 2010-2019 (-1,9 %/año) e insuficiente para cumplir el objetivo de los 2 °C. Además, el Banco Mundial (2023) indica que un total de 62 países, que representan el 93% del PIB mundial, el 47% de la población global y alrededor del 69% del consumo total de energía. Del mismo modo, en otro artículo el (Banco Mundial, 2023) recalca a la energía renovable como otra fuente de energía, con un crecimiento de la energía solar del 27% y de la energía eólica del 13%.

El vertido de algunas industrias va directo a las de agua. Para Bravo-Calle et al. (2021) las aguas residuales contribuyen a la degradación del medio acuático, y, por ende, la consecuencia de desarrollo industrial de forma irresponsable genera contaminación tanto en el agua como en la atmosfera. Según el informe de Organización de las Naciones Unidas para la Educación (2017) a nivel mundial, más del 80% del total de las aguas residuales se vierten sin tratar, estas son provenientes del sector urbano e industrias y apenas el 8% recibe algún tipo de tratamiento.

Para Segura et al. (2020) la gestión de los residuos sólidos en el mundo se manifiesta por la capacidad para recuperar algunos residuos que se puedan reutilizar, y así, obtener altos porcentajes de eliminación de residuos en vertederos. Por parte del Banco Mundial (2022) indica que los países de ingreso alto, si bien representan el 16 % de la población mundial, generan más de un tercio (34 %) de los residuos sólidos del mundo. Además, la Organización de las Naciones Unidas (2023) en su informe relacionado con el reciclaje hace mención a los residuos sólidos, específicamente a las toneladas de plástico producidos en cada año, menos del 10% de los residuos plásticos se reciclan y entre 19 a 23 millones de toneladas de desechos plásticos terminan cada año en cuerpos de agua o las zonas terrestres.

En Latinoamérica la problemática ambiental también es una preocupación gradual entre los ciudadanos. Según Riveros-Gavilanes y Reyes-Vargas (2023) aseguran que los niveles de contaminación ambiental son medidos por las emisiones de toneladas métricas de CO₂. De tal forma el Banco Mundial, (2022) señala que América Latina y el Caribe (ALC) es responsable del 8 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

La Organización Latinoamericana de Energía (2020) revela que el consumo final de energía en el 2019 fue de 618 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). Asimismo, la organización (International Energy Agency, 2021) registra que en el 2020 una participación de 295.21 toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) con una tendencia del incremento de la utilización de electricidad. Para la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2021) en ALC, la energía genera el 55% de las emisiones de Gas de efecto invernadero (GEI).

Ahora bien, para (Fúquene & Yate, 2018) las aguas residuales industriales en ALC son de gran influencia generados por el procesamiento de los recursos en la elaboración de bienes y servicios. Como primer dato por parte de la (Asociación Latinoamericana de Desalación y Reúso de Agua, 2022) apunta a la región ALC donde sólo trata el 20% de sus aguas residuales. Del mismo modo, los residuos sólidos también forman parte de esta problemática ambiental. Según el (Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas, 2018) indica que la generación de residuos sólidos en los países de ALC alcanzó un volumen de casi 540.000 toneladas diarias y se predice que, para el año 2050, la basura originada en la región llegue a las 671.000 toneladas cada día.

Por otra parte, En el ámbito de las industrias manufactureras en el Ecuador, las pequeñas y medianas empresas (Pymes) cumplen más prácticas de Responsabilidad Social (RS). Según el Banco Mundial (2022). El sector manufacturero constituye uno de los actores importantes de la economía en un país, ya que, según datos del Banco Mundial, el valor agregado de la industria a precios actuales en el año 2022 es de 31.5% del PIB mundial. Por lo tanto, el Ministerio de Energía y Minas (2021) indica que, en el Ecuador las industrias provocan mayor cantidad de emisiones de CO₂, es así que durante el 2021 el incremento se ha elevado 7,108 megatoneladas, un 20,89% relacionado a 2020.

Además, según el informe emitido por el Ministerio de Energía y Minas (2022) recalca que sector eléctrico del país en el año 2021, se redujo a 1.204 kilotoneladas de dióxido de carbono emitidas al ambiente, comparado con las 5.922 kilotoneladas generadas años anteriores. Asimismo, el (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2020) menciona que el 8,7% de origen renovable el cual en la actualidad esta tomando mayor influencia en la sociedad ecuatoriana.

A continuación, el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2021) muestra que, en el 2021, se registró un total de 1.195 fuentes de agua cruda, el 46,6 % son fuentes superficiales y el 53,4 % son fuentes subterráneas, entre las principales están pozos, vertientes, quebradas, ríos y arroyos. De tal forma que el Ministerio del Ambiente (2022) señala que en el país se reconocen 577 plantas de tratamiento de agua residual, los mismos están distribuidas en 164 distritos. Del total de agua distribuida por los

municipios, el 22,3 % en promedio al mes ingresan a las plantas de tratamiento de agua residual.

Finalmente, Solíz Torres et al. (2020) menciona que, en el Ecuador se generan más de 13 mil toneladas de desechos sólidos al día, la misma cifra se distribuye en el 55.65% son residuos orgánicos y el 44.35 % inorgánicos. Asimismo, el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2022) ha recolectado datos donde el 51,6 % de GADM disponen los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, el 29,9 % en Celdas Emergentes y el 18,6 % en Botaderos.

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación teórica, metodológica (viabilidad) y práctica

La industria manufacturera y la sostenibilidad ambiental son dos aspectos importantes que deben considerarse en conjunto para lograr un equilibrio y así contribuir a un desarrollo sostenible y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras. Como mencionan, Enriquez y Kolodziej (2018) En la simulación y optimización de un sistema de manufactura, se busca encontrar los valores óptimos de los parámetros de entrada con el fin de lograr el mejor rendimiento del sistema. Para Valdez Jaimes et al. (2020) señalan que en los últimos tiempos se han realizado un gran esfuerzo para efectuar la sostenibilidad a través de los pactos suscritos por líderes políticos a nivel mundial.

De acuerdo con Vega et al. (2020) señalan que la optimización se dirige como un proceso de encontrar la mejor opción dentro de la inversión económica cumpliendo con minimizar el impacto sobre el medio ambiente. Por otro lado, Sandoval (2020) da un poder a las estrategias de optimización para que sea orientado a los ejes de desarrollo sostenible se dan como un método basado de manera inteligente en los elementos abordados con el objetivo de adaptarse a las condiciones de mayor potencia y contrarrestar la degradación. Además, Blanco Orozco y Giraud, (2022) hacen énfasis en la proporcionalidad que va desde directrices de organización hasta disciplina con el fin de prevenir el uso inapropiado de los recursos y crear un entorno de trabajo más favorable. A diferencia de, López et al., (2021) que da un enfoque ideal al modelo de

optimización donde este método proporciona las cualidades necesarias para evaluar, analizar y resolver las variables que requieren atención.

El presente estudio aplica distintos métodos de investigación como: búsqueda sistemática, análisis bibliométrico y análisis multicriterio. Se pretende seleccionar un modelo matemático de optimización basado en los objetivos ambientales para la industria manufacturera del Ecuador, iniciando por una revisión bibliográfica, investigando literatura académica y técnica para identificar los modelos matemáticos de optimización que se alineen con los objetivos ambientales para la industria de manufactura. La revisión literaria se realizará mediante la herramienta PRISMA y VOSviewer basada en examinar exhaustivamente la literatura existente. Durante este proceso, se utilizan términos de búsqueda específicos y se utilizan buscadores y bases de datos especializados como Scopus, Web of science (WOS) y Scielo para encontrar y recopilar los documentos relevantes.

Una vez que se haya procedido a la revisión bibliográfica, se empleará el modelo Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) donde se define los criterios, variables y parámetros que serán considerados en el modelo matemático de optimización. Y, por ende, este método de ponderación define la categoría de los mismos mediante una escala de valor que se da al nivel de importancia a partir de sus valores normalizados por el rango. Estos deben estar alineados con los objetivos ambientales establecidos para la industria manufacturera.

Para concluir con la búsqueda del modelo de optimización, se utiliza el modelo Analytic Hierarchy Process (AHP) para evaluar y comparar los diferentes modelos matemáticos en función de los criterios definidos. El método AHP permitirá asignar pesos relativos a los criterios y llevar a cabo una evaluación comparativa de las alternativas. Esto ayudará a identificar el modelo matemático más adecuado para los objetivos ambientales.

Este trabajo examina los distintos modelos matemáticos de optimización, mencionando que en la actualidad la conciencia ambiental, la sostenibilidad y la industria de manufactura se enfrenta a la responsabilidad de minimizar su impacto ambiental mientras busca mantener eficiencia y competitividad. En este sentido, el

desarrollo de un modelo matemático de optimización específico para la industria de manufactura en Ecuador se vuelve fundamental. Además, este se seleccionará por la necesidad de lograr un equilibrio entre la eficiencia operativa, la competitividad empresarial y la responsabilidad ambiental.

Finalmente, en esta investigación será de gran ayuda para apoyar la toma de decisiones para un desarrollo sostenible en términos del modelo matemático de optimización, ayudando a la industria manufacturera conjunto a los objetivos ambientales.

1.2.2. Formulación del problema de investigación

¿Cuál es el modelo matemático de optimización que más se ajusta a los objetivos ambientales?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Seleccionar un modelo matemático de optimización basado en los objetivos ambientales para la industria manufacturera del Ecuador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los modelos matemáticos de optimización basados en los objetivos ambientales de la industria manufacturera.
- Categorizar los criterios de modelización basados en sostenibilidad ambiental que se ajusten al modelo matemático de optimización.
- Discriminar el modelo matemático que optimice los objetivos ambientales en la industria manufacturera.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Revisión de Literatura

2.1.1 Antecedentes investigativos

En la presente investigación se detalla los aportes científicos realizados por varios autores a lo largo de los años. La teoría ambiental tiene por objetivos la mejora continua de la actuación medio ambiental, empresarial y el cumplimiento obligatorio de las disposiciones ambientales de los países (Rendón Acebedo et al., 2017). Asimismo, es importante destacar que la sostenibilidad se basa en mejorar la calidad de vida y el bienestar completo de las personas, sin aumentar el consumo de recursos naturales más allá de lo que el ambiente puede proporcionar de manera indefinida (Gallegos, 2015).

Para el estudio de Olvera Lara y Olvera Lara (2018) mencionan a la utilización eficiente de los recursos, buscando desarrollar infraestructuras que eviten dañar el medioambiente. Del mismo modo, un modelo matemático utilizado para optimizar decisiones estratégicas dentro de la sostenibilidad integra objetivos económicos para varias decisiones tácticas y estratégicas (Robles, 2017). También la sostenibilidad ambiental se basa en mantener el equilibrio y la salud de los recursos naturales con el medio ambiente, trata de encontrar formas de progresar y desarrollarse de manera responsable, teniendo en cuenta el impacto a largo plazo en el planeta y en las personas. Dentro de las Normas ISO (International Organization for Standardization) la sostenibilidad se logra a través de la interdependencia y el refuerzo mutuo de metas sociales, económicas y ambientales International Organization for Standardization (2010). Del mismo modo, la entidad ONU (1987) menciona que el desarrollo sostenible es una forma de lograr un crecimiento económico y la protección del medio ambiente.

En el estudio realizado por de Feitó Cespón et al. (2016) mencionan que el modelo de optimización integra objetivos económicos y medioambientales con el fin de respaldar

la toma de decisiones estratégicas y tácticas, como la ubicación de instalaciones, el diseño de flujos de materiales y la selección de medios de transporte. En otro estudio se indican las empresas manufactureras muestran que los objetivos ambientales están estrechamente comprometidos con el medioambiente para generar capacidades estratégicas cen estándares ambientales (Cornejo-Cañamares et al., 2021).

La gestión ambiental en Latinoamérica se refiere a los esfuerzos y acciones destinados a proteger y preservar el entorno natural en los países de esta región. Lozano Gómez y Barbarán Mozo (2021) indican que la gestión ambiental busca involucrar a la comunidad en la toma de decisiones para proteger el medio ambiente y promover un desarrollo sostenible. Del mismo modo, Pataca Rodríguez y Flores (2022) sugieren que, para un desarrollo sostenible se pueden generar programas de sostenibilidad, con el objetivo de crear nuevos recursos para el mejoramiento de diferentes actividades que puedan impactar en la calidad de vida de las personas. Además, un modelo de gestión ambiental puede convertirse en una herramienta que forja beneficios ambientales, cuando los programas que en él se implementan efectivamente cumplen con su objetivo con respecto

Con respecto a la gestión ambiental, los estudios de Bellgran y Bruch (2015) señalan que el área ambiental dentro de una empresa manufacturera es esencial, ya que afecta tanto al desarrollo de la estrategia ambiental como a su consecuente ejecución durante la fase de operaciones. También para Acuña et al. (2016) la gestión ambiental debe ocupar un lugar focal dentro de los objetivos misionales de las organizaciones, los indicadores de productividad y calidad no deben estar separados de las distintas variables que mantienen el control ambiental; y así mismo, garantizando la mayor responsabilidad en la cadena productiva.

Por otra parte, Latif et al. (2017) hacen mención a la situación de las industrias manufactureras y a los factores que influyen en la fabricación sostenible, e indican que es importante tener un índice de sostenibilidad significativo a través del cual las industrias puedan compararse entre sí. La globalización ha fomentado el surgimiento de clientes conscientes del medio ambiente y que apoyan las prácticas ecológicas sostenibles con la intención de los propietarios/gerentes hacia lo ecológico y la adopción de tecnología ecológica en las PYME manufactureras Cai et al. (2019). Asimismo, la industria manufacturera ha sido considerada como la principal fuente de

daños al medio ambiente por su un gran consumo de energía, Por tal motivo, para hacer frente al calentamiento global, los organismos gubernamentales de todo el mundo piden la implementación verde de la industria (Yacob et al., 2019)

Un punto que es importante recalcar son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el objetivo 12 con un propósito de garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. Alzate et al. (2018) señalan que, en la actualidad, existe una creciente presión en temas medioambientales por parte de diversas partes interesadas en los países Latinoamericanos. La Organización de las Naciones Unidas tiene como meta principal exhortar a las empresas, de manera especial las magnas empresas y las empresas a nivel mundial decidan acoger prácticas sostenibles y unan información sobre la sostenibilidad en su lapso de introducción de informes (ONU, 2018).

La industria manufacturera es el sector más notable en el Ecuador con una gran capacidad de fortalecer al país. Dentro del criterio de Zapata et al. (2022) reiteran que la industria manufacturera desempeña un papel fundamental en Ecuador, ya que, no solo se encarga de la producción de bienes con valor añadido sino de mejorar el patrimonio del país. Además, Salazar (2017) menciona que impulsa a este sector como un efecto positivo en otros sectores, como el comercio y los servicios, generando dinamismo y desarrollo. Es de gran importancia analizar la estructura de capital de las empresas que radica en desarrollar modelos que permita utilizar eficientemente los recursos disponibles Gutiérrez et al. (2019).

En cuanto a, Zapata et al. (2022) señalan la importancia al sector manufacturero basado en el crecimiento de una economía el cual se encuentra estrechamente vinculado de forma positiva. La finalidad de la gestión ambiental en las industrias del Ecuador es evaluar la gestión del medio ambiente, para así determinar en qué medida se aplican las Buenas Prácticas Ambientales (BPA) y su impacto en el desarrollo sostenible (Malavé & Fernández, 2019).

Alcocer Quinteros et al. (2020) diseñaron un modelo de multicriterio para la optimización de residuos sólidos en el cantón de Quevedo, este estudio examina la cadena de suministros de residuos sólidos urbanos que permite revelar los principales problemas que afectan a este cantón. Castañeda Torres & Rodríguez Miranda (2017).

Buscaron un modelo de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, el mismo que responde a la necesidad de una herramienta que apoye en la toma de decisiones para la planificación y gestión de los residuos sólidos orgánicos. Mercado & Peña (2016) Demostraron que un modelo de optimización matemático es la clave para el mantenimiento de la energía, lo cual es la clave para mejorar y mantener los planes actualizados de mantenimiento, propensos a satisfacer todas las partes interesadas en este sector. Ibarra-Taquez et al. (2018) evaluaron el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una industria de café soluble colombiana con un método de optimización multiobjetivo, con el fin de permite alcanzar los límites de concentración de dióxido de carbono exigidos por la legislación colombiana. Montoya et al. (2021) utilizaron un modelo matemático de enteros mixtos para incluir fuentes fotovoltaicas en la red de corrientes continuas, el mismo que busca minimizar las pérdidas diarias de energía y las emisiones de efecto invernadero derivadas por los generadores en áreas aisladas.

2.1.2 Fundamentos teóricos

2.1.2.1 Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental hace relación a la armonía existente entre lo económico, lo social, lo ambiental con el sistema de valores, la misma que se obtiene siempre y cuando los recursos naturales pasar por deterioro por la explotación y este mismo cuando se mantenga dentro de los ciertos límites de la regeneración y el crecimiento natural, mediante la explotación de los recursos y de precisar los efectos que la explotación tendrá a largo plazo, sobre el conjunto del ecosistema (Zarta Ávila, 2018). Todos los países afrontan grandes desafíos que con el tiempo se están estrechamente unidos con la preservación medioambiental y estos son:

Tecnología: A medida que la tecnología crece en las ciudades sean las ciudades, pueden ser mejores, más eficaces y sostenibles.

Economía circular y el uso de la energía: Es esencial que las ciudades sean consumidoras de energías limpias. No basta con reciclar, hay que optimizar y multiplicar la vida útil de las materias primas y los productos.

Movilidad: Es un servicio importante dentro de las ciudades y junto con la vivienda, en donde mayor margen de mejora tenemos para reducir las emisiones de CO₂. La movilidad urbana, pública y privada, debe ser eléctrica en el menor plazo posible.

2.1.2.2 Objetivos ambientales

Los objetivos ambientales son metas generales que una empresa establece para mejorar su desempeño en cuestiones ambientales. Estos pueden ir desde reducir el consumo de agua hasta aumentar la eficiencia energética. Estas metas ambientales son acciones que se llevan a cabo para lograr un objetivo específico (International Organization for Standardization, 2015). Además, los objetivos ambientales están alineados con la meta final establecida por la empresa. Cada compañía debe establecer sus propios objetivos ambientales de acuerdo a sus funciones y mantener un registro documentado de los objetivos que desea alcanzar en materia ambiental Energy Go (2023). Los desafíos presentes en los objetivos ambientales más relevantes es el cambio climático, ya que tiene impactos generalizados en la calidad de vida de las personas y los ecosistemas. A nivel local, en cambio, se suma la contaminación del aire por riesgos para la salud.

Reducción de las emisiones o concentraciones de los contaminantes del aire.

La contaminación atmosférica se refiere a la presencia en la atmósfera de sustancias en cantidades que pueden causar molestias o representar un riesgo para la salud de las personas y otros seres vivos. Estas sustancias pueden ser de cualquier naturaleza y pueden atacar diferentes materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables. El término "contaminación atmosférica" se utiliza generalmente para describir las alteraciones que tienen efectos perjudiciales en los seres vivos y los elementos materiales, y no para otras alteraciones inofensivas (Francho, 2021). Los componentes de contaminación atmosférica son las técnicas industriales que involucran la combustión, tanto en industrias manufactureras. Estos procesos generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. Además, algunas industrias emiten gases nocivos en sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos que no han realizado combustión completa.

Prevención de la contaminación de aguas superficiales mediante la liberación de las aguas residuales.

El agua dulce es un recurso escaso y valioso, que puede contaminarse fácilmente. Una vez contaminado en la medida en que puede considerarse “contaminada”, la calidad del agua dulce es difícil y caro de restaurar. El estudio de las aguas superficiales la contaminación se ha centrado principalmente en arroyos y lagos, y la mayoría de las herramientas científicas desarrolladas. (Walker et al., 2019). Se han aplicado para proteger la calidad del agua en este segmento de las aguas superficiales de la Tierra. El agua almacenada en embalses y lagos se utiliza para el suministro de agua dentro de la agricultura, la industria y la recreación, esta agua puede ser fácilmente contaminado.

Prevención de la generación de los residuos o desechos, reducción con referente a los efectos del medio ambiente.

En los sistemas naturales no existen los residuos. Todo fluye en un ciclo natural de uso y reutilización. Los organismos vivos consumen materiales y eventualmente los devuelven al medio ambiente, generalmente en una forma diferente, para su reutilización. Los residuos sólidos (o basura) son un concepto humano. Se refiere a una variedad de materiales desechados, no líquidos ni gaseosos, que se consideran inútiles o sin valor (Loganath y Senophiyah-Mary, 2020). Los humanos modifican las sustancias naturales, haciéndolas más difíciles de descomponer, o almacenan materia en condiciones que retardan su degradación. Sin embargo, lo que no tiene valor para una persona puede serlo para otra, y los desechos sólidos pueden considerarse recursos fuera de lugar. Aprender formas efectivas de reducir la cantidad de desechos producidos y reciclar los valiosos recursos contenidos en los desechos es importante si los humanos desean mantener un medio ambiente habitable y sostenible.

Prevención la infiltración de contaminantes de suelos y aguas subterráneas

La gestión de las aguas pluviales en sitios con suelos o aguas subterráneas contaminadas es un desafío porque la escorrentía infiltrada tiene el potencial de transportar contaminantes del suelo al agua subterránea o movilizar contaminantes en el agua subterránea. Las aguas pluviales en sitios contaminados pueden gestionarse mediante captura y tratamiento superficial, o como infiltración evitando el contacto entre la escorrentía y los suelos y aguas subterráneas contaminados. La captura superficial incluye prácticas de filtración y sedimentación. Al considerar la captura

superficial y el tratamiento de la escorrentía en sitios contaminados, el sistema de tratamiento de captura superficial generalmente necesitará una barrera impermeable para evitar la infiltración y la posible movilización de contaminantes en el suelo o el agua subterránea (Weiss et al., 2021). Al considerar la infiltración de aguas pluviales en sitios contaminados, es esencial desarrollar opciones de gestión para garantizar que los contaminantes no se movilizan. Para lograr esto, el proponente del proyecto debe comprender las condiciones del sitio (por ejemplo, suelos, hidrogeología, uso de la tierra), la naturaleza y el alcance de la contaminación (es decir, el modelo conceptual del sitio) y las regulaciones aplicables. Las siguientes páginas brindan información sobre estos temas, incluidos estudios de casos y enlaces a información y orientación adicionales.

Administración y gestión del ambiente; educar, capacitar, informar en materia ambiental

La educación ambiental es un proceso que permite a las personas aprender sobre los problemas ambientales, participar en su solución y tomar medidas para mejorar el medio ambiente. Como resultado, la gente comienza a comprender más profundamente de los problemas ambientales y tienen las habilidades para tomar decisiones informadas y responsables. (Debrah et al., 2021). La educación ambiental no defiende un punto de vista o curso de acción particular. Más bien, la educación ambiental enseña a las personas cómo sopesar los diversos aspectos de un problema a través del pensamiento crítico y mejora sus propias habilidades para resolver problemas y tomar decisiones.

Minimización de la extracción de recursos hídricos mediante la modificación de procesos

El impacto de la población en los recursos hídricos se ha vuelto cada vez más evidente en los últimos años, resaltando la estrecha relación entre los niveles de componentes inorgánicos, principalmente en el agua contaminada y por ende, la salud de la comunidad. Caracterizar las variables que indican la contaminación del agua es un proceso complejo. Los recursos hídricos están expuestos a la contaminación y por ende es el lugar más contaminado a nivel mundial (Pavan et al., 2022).

2.1.2.3 Industria Manufacturera

La pequeña y mediana empresa (Pymes) se destacan a nivel tanto local como mundial sin embargo tienen una gran desventaja con respecto a las grandes empresas, en la mayoría de los países, la globalización, los acelerados cambios tecnológicos y la capitalización (Beck Demircuc-Kunt, y Martínez Peria, 2020)

La industria manufacturera es una actividad económica mediante la cual las materias primas se convierten en bienes y productos. Se dedica a convertir productos semiacabados o materias primas directamente en bienes de consumo final, listos para su comercialización inmediata a través de distribuidores y otros mecanismos que los acerquen a su público consumidor (Instituto nacional de estadísticas y censos, 2020). El mayor desafío para las industrias es la tecnología avanza a un gran ritmo y ahora existen innumerables innovaciones tecnológicas que hacen que la mayoría de los fabricantes se esfuercen por mantenerse al día (Cueva-Vargas & Cortés-Palacios, 2020) .

2.1.2.4 Modelo De Programación Lineal (PL)

Es un modelo matemático utilizado para resolver problemas de optimización en los que se busca maximizar o minimizar una función lineal sujeta a un conjunto de restricciones lineales. Esta condición se considera todos aquellos modelos de optimización donde las funciones que lo componen, es decir, función objetivo y restricciones, son funciones lineales en las variables de decisión Muñoz Guillermo (2023).

Un modelo de Programación Lineal en su forma estándar se expresa por:

$$\begin{aligned}
 & c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n \\
 \text{Max} & \\
 & a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n \leq b_1 \\
 \text{sa} & \\
 & a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n \leq b_2 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n \leq b_m \quad x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \text{ y } m \\
 & \leq n
 \end{aligned}$$

Matricialmente escrito como:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & c^T x \\ \text{s.a} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

- Es posible cambiar un problema de maximización a uno de minimización. Si $f(x)$ es la función objetivo a maximizar y x^* es la solución óptima $f(x^*) \geq f(x)$, para todo x factible. $-f(x^*) \leq -f(x)$, para todo x factible.
- Cada restricción del tipo \leq puede ser llevada a una ecuación de igualdad usando una (nueva) variable de holgura no negativa, con coeficiente nulo en la función objetivo.
- Cada restricción del tipo \geq puede ser llevada a una ecuación de igualdad usando una (nueva) variable de exceso no negativa, con coeficiente nulo en la función objetivo.

Puntos importantes de relevancia para la utilización de programación lineal.

Toma de decisiones: La programación lineal permite tomar decisiones basadas en datos y de forma objetiva. Esto se debe a que se utilizan modelos matemáticos que representan claramente la situación a resolver y nos permiten encontrar la mejor solución posible.

Optimización: La programación lineal se utiliza para optimizar procesos y recursos en una amplia variedad de áreas como producción, ventas, planificación y gestión de proyectos.

Eficiencia: la programación lineal permite un uso más eficiente de los recursos porque los recursos se pueden planificar y asignar de manera óptima. Esto puede reducir los costos y aumentar la eficiencia del proceso.

Innovación: Dentro de la programación lineal permite esclarecer problemas complejos y encontrar soluciones en el ámbito de innovación. Esto es particularmente importante en áreas como la ingeniería, la ciencia y la tecnología, donde se requieren soluciones innovadoras para avanzar.

Método de las regiones factibles

Este método se utiliza si existen restricciones en forma de desigualdades en problemas de programación lineal. En este método, el espacio variable se divide en varias regiones factibles y cada región se prueba para encontrar la solución óptima.

Tabla 1

Métodos de programación lineal

Criterio	Método Gráfico	Método Simplex	Método de Lagrange	Método Regiones Factibles
Aplicabilidad	Problemas con 2 variables y restricciones sencillas	Problemas con múltiples variables y restricciones	Problemas con restricciones de igualdad	Problemas con 2 variables y restricciones de desigualdad
Resolución	Gráfico y visual	Iterativo y algorítmico	Matemático y analítico	Gráfico y visual
Escalabilidad	Limitado a problemas pequeños	Puede manejar problemas más grandes y complejos	Limitado a problemas específicos	Limitado a problemas pequeños
Restricciones de igualdad	No admite igualdades	Se pueden manejar igualdades	Requiere igualdades específicas	No admite igualdades
Precisión	Precisión limitada	Mayor precisión	Mayor precisión	Precisión limitada

Velocidad de convergencia (en problemas grandes)	No aplicable	Rápida convergencia	Convergencia variable	No aplicable
Uso típico	Introducción a la programación lineal	Resolución de problemas de programación lineal	Problemas con restricciones de igualdad	Problemas pequeños de programación lineal

Nota. La grafica indica los métodos de programación lineal. **Fuente:** Salazar López (2023) Elaboración propia.

2.1.2.5 Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos se ajustan a teorías que se desean desarrollar. Un modelo matemático se puede precisar como una ecuación o conjunto de ecuaciones que suponen de manera aproximada la relación estímulo-respuesta de un procedimiento (Linares et al., 2014). También analizan las implicaciones que tienen las diversas características de la experiencia consciente en la estructura matemática, proporciona una explicación precisa de cómo los conceptos desarrollados en filosofía de la mente se relacionan con la estructura matemática de los modelos de conciencia (Kleiner, 2020).

El mundo globalizado exige que las empresas tengan que proyectar el uso de sus recursos para lograr altos rendimientos y ser competitivas. El uso de los modelos de optimización que nos ofrece la investigación de operaciones, tanto determinísticos como estocásticos, se busca obtener una utilización óptima de los recursos (Pérez Peña, 2019).

Tabla 2

Métodos de optimización

	Lineal
Métodos Clásico	Lineal Entera Mixta
Métodos de Optimización	No Lineal
	Estocástica

	Dinámica
Métodos Metaheurísticos	Algoritmos Evolutivos
	Búsquedas Heurísticas

Nota. La grafica indica los métodos de optimización existentes. Fuente: Elaboración propia.

Al hablar de optimizar, se busca encontrar una alternativa de decisión que permita mejorar un determinado sistema. Los modelos matemáticos buscan ayudar a establecer mejores políticas y actuaciones respetos a casos específicos de estudio, como es el caso de las externalidades negativas del transporte público urbano de la ciudad de Ambato.

Entre los componentes para el desarrollo de un modelo matemático de optimización, se tienen la función objetivo con el propósito del estudio (maximización o minimización), las variables ya sean estas dependientes o independientes y las restricciones que limitan el modelo

2.1.2.6 Elementos de modelos matemáticos

Función Objetivo

Este elemento es la representación matemática de lo que queremos optimizar. La función objetivo se define como conjunto de restricciones, a un conjunto de ecuaciones o inecuaciones matemáticas que representarán las limitaciones de los problemas. Dentro de este elemento la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema es la que se desea optimizar ya sea maximizar o minimizar. (Cabrera Rodríguez, 2023)

$$\min(Z) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$\max(Z) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n$$

Variables de decisión

Las variables de decisión, son en teoría, elementos controlables del sistema que se está formando, estas pueden tomar distintos valores posibles, de los cuales se precisa conocer su valor óptimo, que ayude con la obtención del objetivo de la función general de los problemas. Las variables de decisión como una representación que se puede tomar para afectar el valor de la función objetivo, y, por ende, pueden clasificarse en variables independientes o variables dependientes (Salazar López, 2019).

$$a_{1i}x_1 + a_{2i}x_2 + \dots + a_{ni}x_n \geq b_i \quad \text{para todos los valores de } i$$

Restricciones

Según (Goldratt, 1993) citado por Villagómez et al., 2012) es todo un proceso de mejoramiento continuo, basado en un pensamiento sistémico, que ayuda a las empresas a incrementar sus utilidades desde un punto de vista práctico, el mismo que es identificando con las restricciones para conseguir sus objetivos.

Representan el conjunto de relaciones (expresadas por ecuaciones y desigualdades) que deben satisfacer determinadas variables. Por ejemplo, la producción operativa máxima y mínima de un grupo de producción, la capacidad de producción de la fábrica para diversos productos, las dimensiones de la materia prima del producto, etc.

x_j no esta restringida en su signo para todos los valores de $x_j \geq 0$ para todos los valores de j

Los símbolos generados se detallan a continuación:

Z = valor de la medida global de desempeño

x_j = nivel de la actividad j (para $j = 1, 2, \dots, n$)

c_j = incremento en Z que se obtiene aumentando una unidad en el nivel de j

b_i = cantidad de recurso i disponible para asignarse a las actividades i

a_{ij} = cantidad del recurso i consumido por cada unidad de la actividad j

2.2. Hipótesis (opcional) y/o preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los objetivos ambientales establecidos para la industria manufacturera en Ecuador?
- ¿Qué modelos matemáticos de programación lineal existen, que incluyan variables de sostenibilidad ambiental?
- ¿Cuál es el modelo matemático de optimización que más se ajusta a los objetivos ambientales en la industria manufacture ecuatoriana?

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Recolección de la Información

3.1.1 Población

El estudio se centra en identificar criterios, variables y parámetros de modelización que corresponden a un modelo de optimización matemática, así como en aplicar un método de toma de decisiones analítico jerárquico multicriterio para seleccionar un modelo matemático. La población de este proyecto de investigación es el sector manufacturero ecuatoriano, conformado por 703 empresas; información obtenida del Módulo de Investigación Empresarial Estructural Ambiental (ENESEM) 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), que permite definir grupos de categorización de criterios de sostenibilidad y objetivos ambientales para estudios relevantes; El estudio no proporciona un cálculo aproximado.

3.1.2 Fuentes de información

3.1.2.1 Fuentes primarias

Para el presente estudio no se utiliza fuentes primarias.

3.1.2.2 Fuentes secundarias

La información para el desarrollo del proyecto será obtenida de fuentes secundarias, específicamente de la encuesta estructural de empresas ENESEM 2020, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC del apartado información económica ambiental en empresas. Las fuentes primarias es documentación directa, es decir, información original y de primera mano. Se enfoca en generar ideas, conceptos, teorías y resultados sobre los modelos matemáticos de optimización, que se encuentran artículos científicos, así mismo en bases de datos como: Scopus, WOS y Scielo para encontrar y recopilar los documentos relevantes

3.1.3 Técnicas e instrumentos

3.1.3.1 Técnicas

Encuesta

El instrumento que se va a utilizar para la investigación es la ficha de registro de datos estadístico, la cual es la base de información de la encuesta estructural de empresas

ENESEM 2020, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC. Los datos proporcionados permitirán un análisis detallado de las variables de estudio.

3.1.3.2 Instrumento

Cuestionario

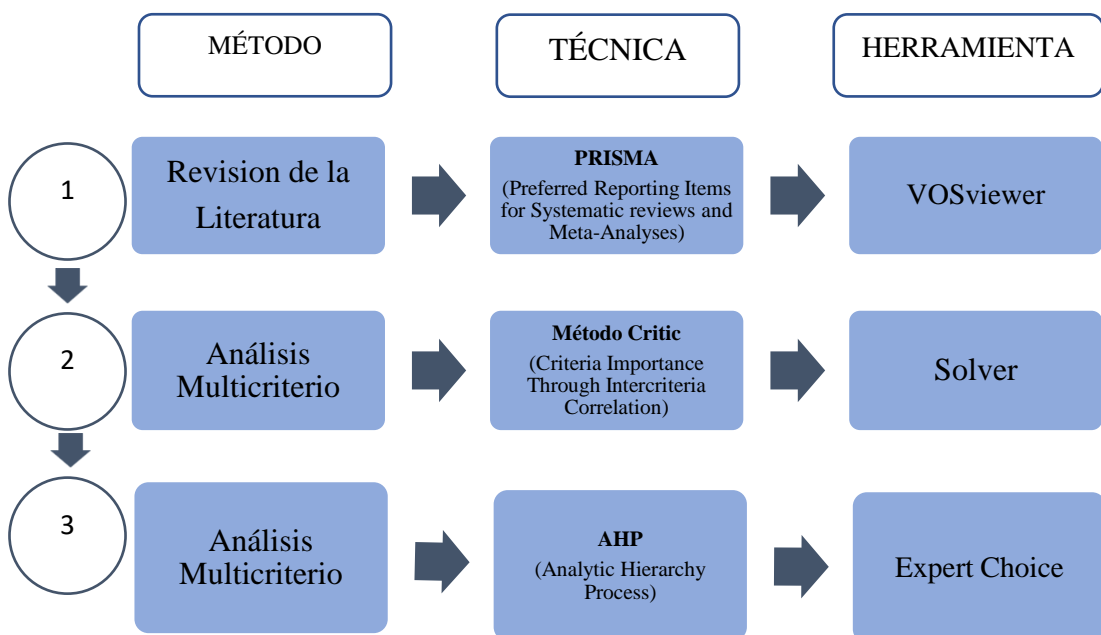
El cuestionario formulado para levantar información se compone de este instrumento que lo aplica el INEC, considerando los elementos memorables y los que se alinean a la temática de esta investigación, y se evalúa bajo parámetros internacionales determinando su confiabilidad.

3.2 Tratamiento de la información

El nivel de estudio determina la estrategia de la investigación, el presente estudio alcanza niveles de investigación que son: búsqueda sistemática y análisis multicriterio, estos se detallan a continuación.

Figura 1

Diagrama de tratamiento de la información



Nota: La ilustración anterior muestra un diagrama de procesos de cómo se desarrolla la presente investigación. **Fuente:** Elaboración Propia

Para la presente investigación se selecciona un modelo matemático de optimización basado en los objetivos ambientales para la industria manufacturera del Ecuador.

Para el primer objetivo se identifican los modelos matemáticos de optimización basados en los objetivos ambientales de la industria manufacturera, el mismo que será encontrado a través de una revisión de la literatura, usando la técnica PRISMA la cual ayuda con una búsqueda exhaustiva de estudios relevantes en bases de datos. Para esta búsqueda se utiliza la herramienta Vosviewer que es un software que ayuda a construir y visualizar redes bibliométricas.

El segundo objetivo busca categorizar los criterios de modelización basados en sostenibilidad ambiental que se ajusten al modelo matemático de optimización, el método utilizado para este objetivo será un análisis de multicriterio, la cual utiliza el modelo CRITIC ayuda a la ponderación de criterios que define la importancia de los mismos objetivos ambientales, y la herramienta que se utiliza es Solver el cual permite obtener la solución óptima para distintos problemas de decisión que tendremos en cuenta.

Finalmente, para el tercer objetivo que se basa en discriminar el modelo matemático que optimice los objetivos ambientales en la industria manufacturera se utiliza el método de análisis de multicriterio, para este caso se utiliza la técnica de AHP que permite tomar decisiones de multicriterio, además genera escalas de prioridades basándose en juicios expertos, esto se realizara a través de la herramienta Expert Choise que es un software de toma de decisiones que se basa en la toma de decisiones de criterios múltiples y así ayudara a encontrar al mejor modelo matemático de optimización que más se ajuste a los objetivos ambientales para la industria manufacturera.

A continuación, se detalla con más precisión cada método, técnica y herramienta que se utiliza.

3.2.1 Revisión de la literatura

PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses)

El método PRISMA es una lista de verificación de requisitos para realizar revisiones sistemáticas y metaanálisis de ensayos. Fue creado en 2009 con el objetivo de ayudar a los autores a justificar su investigación y explicar sus hallazgos.

La sigla PRISMA significa Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (Elementos de Informe Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis).

En 2020, se realizó una actualización del método PRISMA para reflejar los avances desde su creación inicial. Ahora consta de 27 elementos que siguen la estructura de un artículo científico y detallan la información importante de cada sección. También incluye un diagrama de flujo para visualizar el proceso de manera gráfica (Page et al., 2021).

Las revisiones sistemáticas son indispensables en varios aspectos, estos pueden proporcionar una síntesis del estado del conocimiento en un área específica o determinada, a partir de la cual se pueden identificar futuras prioridades de investigación, abordar preguntas que de otro modo no podrían ser respondidas por estudios individuales, además puede identificar problemas en la investigación primaria que deben ser corregidos en futuros estudios y generar o evaluar teorías sobre cómo o porque ocurren fenómenos de interés (Page et al., 2021).

Búsqueda de literatura: Se realiza una búsqueda exhaustiva de estudios relevantes en bases de datos, registros y sitios web.

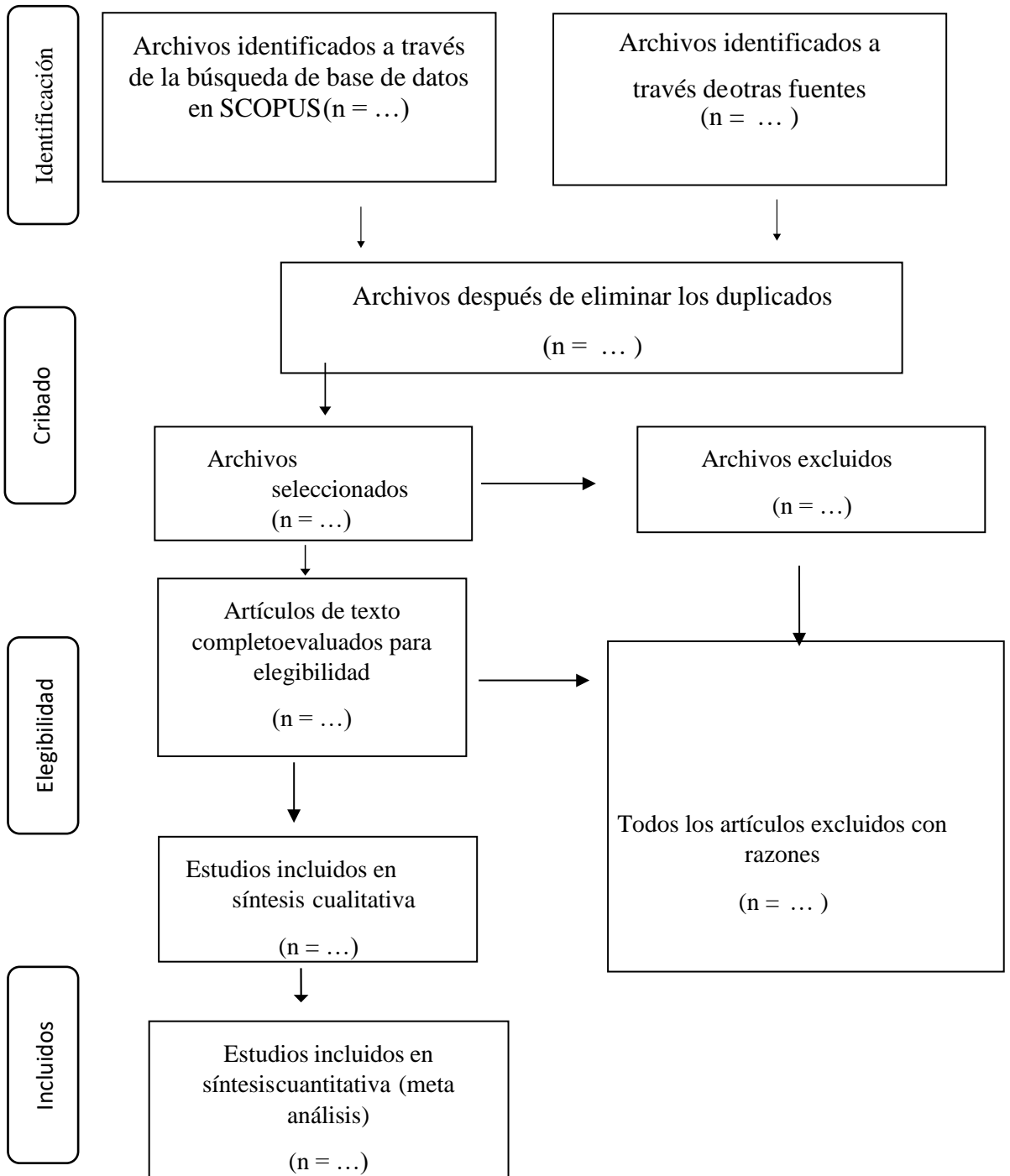
Cribado de estudios: Se realiza una evaluación inicial de los estudios identificados en la búsqueda para determinar su relevancia. Se debe indicar cuántos revisores participaron en el cribado.

Extracción de datos: Se recopilan los datos relevantes de los estudios incluidos en la revisión. Esto puede incluir información sobre los participantes, los métodos utilizados, los resultados obtenidos, entre otros.

Evaluación del riesgo de sesgo: Se evalúa el riesgo de sesgo en los estudios incluidos en la revisión. Esto implica identificar posibles fuentes de sesgo en el diseño y la realización de los estudios y evaluar su impacto en los resultados.

Figura 2

Diagrama de flujo PRISMA



Nota. El diagrama de flujos es la representación exacta de cómo está compuesto el análisis bibliométrico. *Fuente:* PRISMA

VOSview

Es una herramienta utilizada para visualizar y analizar información en forma de mapas de redes. Proporciona una descripción detallada del procesamiento de la información, permitiendo identificar patrones, relaciones y tendencias en los datos (Visualizing Scientific Landscapes, 2019).

El proceso de procesamiento de la información en VOSviewer involucra varios pasos.

1. Recopilación de la información relevante, que puede incluir documentos científicos, artículos de investigación, patentes u otros tipos de datos.
2. Realización de un análisis de concurrencia para identificar la frecuencia con la que los términos o conceptos aparecen juntos en la información recopilada.
3. Generación de mapas de redes que representan visualmente las relaciones entre los términos o conceptos.

Estos mapas pueden mostrar la proximidad y la fuerza de las conexiones entre los elementos de la información.

3.2.2 Análisis Multicriterio

Método Critic (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)

Con el método Critic se obtienen pesos para cada uno de los criterios de tal forma que el peso es tanto mayor cuanto mayor sea su varianza.

El método CRITIC es un método comparativo de criterios que describe la importancia de diferentes criterios considerando sus valores normalizados por el rango (Muñoz & Romana, 2016)

$$W_j = \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} (1 - r_{jk})$$

Donde:

w_j = peso o ponderación del criterio j

s_j = desviación típica del criterio j

$r_{j,k}$ = Coeficiente de correlación entre los criterios j y k

Los pesos obtenidos (w_j) se normalizan por la suma.

Obtenido el peso w_j de cada uno de los criterios se procede al cálculo de la ponderación de las distintas empresas mediante:

$$x_i = \sum_{j=1}^n w_j \times C_{ij}$$

Donde:

x_i es la ponderación de la empresa i

w_j es el peso del criterio j

$c_{i,j}$ es el valor del criterio j para la empresa i

Con el método CRITIC se podrá determinar la ponderación de cada uno de los criterios. principalmente, se procede a la normalización de las variables mediante el rango, para posteriormente calcular la desviación estándar de cada parámetro y la matriz de correlaciones. Los pesos (w_j) se normalizan por la suma, obteniendo la ponderación (w_j estandarizada) de las variables (Aznar Bellver & García García, 2011).

El proceso de procesamiento de la información del modelo CRITIC se puede describir de la siguiente manera:

1. Crear la matriz de decisión
2. Normalizar por el rango los valores de cada uno de los criterios
3. Calcular la desviación estándar de cada criterio
4. Calcular la correlación entre cada par de criterios
5. Calcular el peso de cada criterio

La normalización de las valoraciones de cada alternativa con respecto al rango debe considerar si se trata de un valor que se busca maximizar, como un beneficio, o si es un valor que se prefiere minimizar, como un costo.

El modelo CRITIC proporciona un enfoque sistemático y estructurado para el procesamiento de la información sobre incidentes críticos, lo que permite obtener una descripción detallada y comprensiva de los mismos. Esta información puede ser utilizada para el análisis, la toma de decisiones y la mejora de procesos en diversos contextos.

Solver

Es un complemento de análisis que ayuda a obtener el mejor resultado definiendo una celda que contiene una fórmula (la celda objetivo). Esta celda tiene limitaciones o restricciones de valores. Es decir, qué valores cambiaremos y con qué restricciones para conseguir un resultado óptimo. Es una herramienta que te ayuda a resolver y optimizar ecuaciones utilizando métodos matemáticos (Editors of REA, 2012). El complemento Solver funciona con un grupo de celdas llamadas celdas variables que se utilizan para calcular fórmulas en celdas de destino o de restricción. Por lo tanto, puedes determinar el valor mínimo o máximo de una celda realizando cambios en otras.

Componentes

Función objetivo: Medida de desempeño de la decisión.

Parámetros: no dependen de las decisiones que tomemos

Variables: Forma parte de las decisiones que tomemos, o que se verán afectadas por ellas.

Restricciones: Posibles limitaciones que presenta mi decisión.

3.2.3 Análisis Multicriterio

Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es un modelo utilizado para la toma de decisiones. Fue creado en los años 70 por el matemático Thomas L. Saaty para abordar el tratado de reducción de armamento estratégico entre Estados Unidos y la antigua URSS. Se considera una técnica multicriterio y multiatributo (Mendoza et al., 2019). El AHP permite descomponer eficientemente un problema en distintos niveles a través de la construcción de un modelo jerárquico. Cada nivel se descompone sucesivamente en elementos más simples. En palabras del propio autor, el objetivo es desglosar un

problema en subproblemas y luego unir las soluciones de estos subproblemas en una conclusión.

La estructura general del AHP se compone de una meta u objetivo, criterios, subcriterios o atributos, y alternativas asociadas en los niveles jerárquicos más bajos. Este enfoque permite analizar de forma gráfica y eficiente los diferentes aspectos de un problema y facilita la toma de decisiones informadas (Toskano Hurtado, 2020).}

Ilustración 1

Modelo Jerárquico para la Toma de Decisiones con el AHP

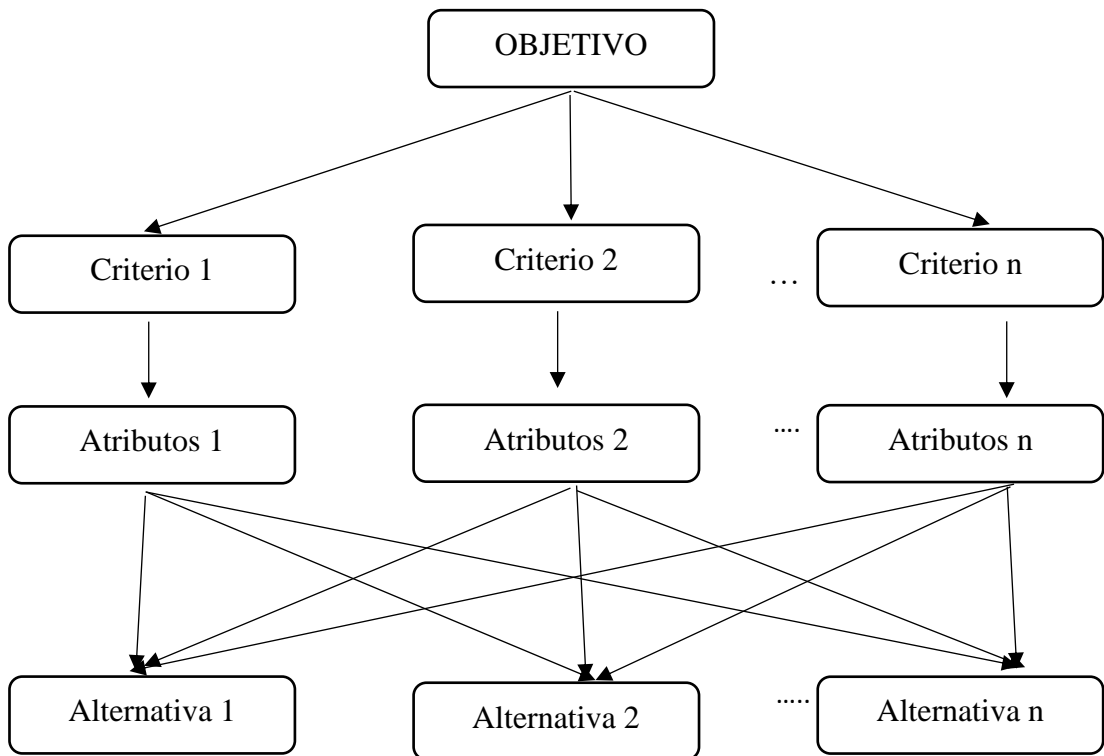


Tabla 3*Escala de Medidas de Saaty*

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la actividad. Siempre ocurre en los elementos de la diagonal de la matriz
3	Moderada	La experiencia y el juicio del experto favorecen levemente a un elemento sobre el otro.
5	Fuerte	La experiencia y el juicio del experto favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro
7	Muy fuerte o demostrada	Un elemento domina fuertemente al otro, y está probado en la práctica.
9	Extrema	Un elemento domina al otro, absolutamente y totalmente claro
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesite un compromiso de las partes entre valores adyacentes.

La valoración de estas comparaciones da lugar a una matriz cuadrada, recíproca y positiva, cada elemento a_{ij} , corresponde al valor comparativo del elemento i con el elemento j , lo que mantiene los criterios de consistencia.

$$\text{Matriz de Comparaciones Pareadas} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Una vez que se ha creado la "matriz de comparaciones pareadas", el siguiente paso es obtener las prioridades correspondientes. Según la definición del autor del AHP, Saaty, las prioridades son rangos numéricos medidos en una escala de razón. En un problema jerarquizado, como en este caso, existen diferentes tipos de prioridades: locales, globales y totales.

Las prioridades locales se refieren a un mismo elemento de un nivel determinado y se calculan a partir de las matrices de comparación. Para calcular este vector de pesos a partir de la matriz, se utiliza el vector principal por la derecha. (Toskano Hurtado, 2020)

Las precedencias globales son aquellas que corresponden a cada elemento de un nivel determinado con respecto al objetivo, que es el elemento del nivel principal. Estas se calculan mediante el principio de composición jerárquica.

Por último, las prioridades totales de las diferentes alternativas se calculan mediante la agregación multiaditiva.

Es importante tener en cuenta la consistencia de los resultados. El AHP analiza la sensibilidad a través de dos parámetros: el Análisis de Consistencia (CI) y el Radio de Consistencia (CR). Estos parámetros miden la calidad de los juicios emitidos al tomar decisiones. Generalmente, se considera adecuado un índice $CR \leq 0.10$ para garantizar la consistencia de los resultados.

Una de las principales ventajas del AHP es su capacidad para tener en cuenta consideraciones técnicas, sociales, culturales y económicas sin necesidad de una escala común de medida. Esto permite que el AHP determine la importancia relativa de estos aspectos al comparar los pesos de los criterios en pares, en términos de importancia, preferencia o probabilidad. Donde, no requiera una escala de medida común, se debe a que presenta su propia escala: la escala 1-9 propuesta por Saaty (autor de la metodología AHP) (Toskano Hurtado, 2020).

Expert Choice

Es un software específico para llevar a cabo el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) ofrece una herramienta para realizar comparaciones entre pares y calcular de forma eficiente los pesos relativos. Permite desglosar un problema complejo en una

estructura jerárquica y evaluar la importancia de cada elemento en relación con los demás. (Collaborative Decision Making, 2021) Esto ayuda a los que toman decisiones a comprender mejor el problema y tomar decisiones informadas. Desarrollado para calcular los pesos de importancia de las diferentes variables que intervienen en el estudio, objeto de este proyecto.

3.3 Operacionalización de las variables

3.3.1 Modelo matemático de optimización

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Modelo matemático de optimización	Modelo matemático de optimización basado en una función objetivo y un conjunto de restricciones en la forma de un sistema de ecuaciones o inecuaciones	Función Objetivo Variable de decisión	Nivel de optimización alcanzado Nivel de eficiencia de las variables de decisión	¿Cuál es el nivel de porcentaje optimo alcanzado con la función objetivo? ¿Cuál será el nivel de eficiencia alcanzado en el modelo	Técnica de Revisión documental

3.3.2 Objetivos ambientales

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Objetivos ambientales	Los objetivos ambientales se refieren a un conjunto de acciones que las industrias han llevado a cabo en sus procesos. También representa un fin o una meta a alcanzar con el propósito de reducir al mínimo o eliminar el impacto ambiental de la operación de una organización	Ambientales	Cantidad en Tn de emisiones reducidas de CO2 Cantidad de agua m3 superficial contaminadas de aguas residuales mediante su liberación Porcentaje de impacto causado al medio ambiente. Cantidad en Tn de contaminantes del suelo y de las aguas subterráneas	¿Cuál es la cantidad de emisiones reducidas? ¿Cuál es la cantidad de aguas superficiales contaminadas? ¿Cuál es la cantidad de impacto reducido? ¿Cuál es la cantidad de aguas subterráneas contaminadas?	Técnica: Análisis documental Instrumento: Ficha de registro de datos secundarios

	Cantidad de sievert del tratamiento de desechos radioactivos	¿Cuál es la cantidad de desechos radioactivos tratados?
	Cantidad de tonelada métrica de los recursos biológicos extraídos de los recursos madereros y acuáticos	¿Cuál es la cantidad de recursos biológico extraídos del medio ambiente?
	Cantidad de m ³ de los recursos hídricos extraídos	¿Cuál es la cantidad de recursos hídricos extraídos?
	Cantidad de ecosistemas rehabilitados en su flora y fauna, hábitats	¿Cuál es la cantidad de ecosistemas rehabilitados?
Económicos	Cantidad ahorrada en unidades monetarias en recursos naturales	¿Cuál es la cantidad de ahorro de los recursos naturales?

	Cantidad monetaria en ahorro de recursos naturales	¿Cuál es la cantidad monetaria de ahorro de los recursos naturales
	Cantidad de Tn en la utilización de los recursos minerales energéticos	¿Cuál es la cantidad de utilización de los recursos minerales energéticos?
	Cantidad de recursos de madereros	¿Cuál es la cantidad de recursos de madereros?
Sociales	Cantidad de lugares destinados a la protección ambiental	¿Cuál es la cantidad de lugares destinados a la protección ambiental?
	Numero de procesos ambientales con certificación.	¿Cuál es la cantidad de material ambiental como los procesos de certificación?

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Resultados y discusión

En esta sección se describe cada objetivo para lograr encontrar un Modelo matemático de optimización basado en los objetivos ambientales para la industria manufacturera del Ecuador.

4.1.1 Revisión de la literatura

Cumplimiento del objetivo 1: Identificar los modelos matemáticos de optimización basados en los objetivos ambientales de la industria manufacturera

Tabla 4

Ecuación booleana

Cadena de búsqueda	Artículo	Base
TITLE-ABS-KEY ("mathematical model" AND "sustainability" AND "linear programming" AND "optimisation" AND "manufacturing industry")	1	SCOPUS
TITLE-ABS-KEY ("mathematical model" AND "sustainability" AND "linear programming" AND "optimisation")	90	SCOPUS
TITLE-ABS-KEY ("mathematical model" AND "sustainability" AND "optimisation" AND "manufacturing industry")	8	SCOPUS
TITLE-ABS-KEY ("mathematical model" AND "sustainability" AND "linear programming" AND "manufacturing industry")	2	SCOPUS
(mathematical model) AND (Manufacturing industry)	3	SCIELO

Nota: La tabla presenta la cadena de búsqueda utilizada para identificar los artículos que más se ajusten al tema **Fuente:** Elaboración propia

El análisis bibliométrico de la tabla muestra patrones y tendencias en el trabajo científico sobre modelos matemáticos. La combinación completa de términos, incluidos “modelos matemáticos”, “sostenibilidad”, “programación lineal”, “optimización” e “industria manufacturera”, dio como resultado un solo artículo en Scopus. Se argumenta que la intersección de estas ideas es un área de estudio inexplorada o poco documentada. Por el contrario, una búsqueda realizada sin el término "industria manufacturera" arrojó resultados más altos en Scopus, lo que sugiere que la inclusión de este término puede limitar la disponibilidad del artículo. Además, cabe mencionar que la cadena de búsqueda en SCIELO arrojó tres resultados con un enfoque más restringido, lo que sugiere que la investigación en este campo también está presente en la literatura de acceso abierto. Además, la tabla explica cómo personalizar las cadenas de búsqueda para obtener las respuestas correctas y enumera dónde existen lagunas en la investigación, así como si los resultados están distribuidos en diferentes bases de datos.

Tabla 5

Artículos encontrados

N°	Artículo/Autor	Tema	Revista
1	(Abbas & ElMaraghy, 2018)	Synthesis and optimization of manufacturing systems configuration using co-platforming	CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology
2	(Abdulrazik et al., 2017)	Utilising biomass for renewable energy production: Optimal profitability evaluation from different processing routes	Journal of Mechanical Engineering and Sciences
3	(Ahn & Kang, 2014)	Optimal planning of water supply system for long-term sustainability	Journal of Hydro-Environment Research
4	(Aktas & Kabak, 2020)	A goal programming model for grid-connected hybrid energy system operations	SN Applied Sciences

- 5 (Alashhab & Mlybari, 2020) Developing a robust green supply chain planning optimization model considering potential risks International Journal of GEOMATE
- 6 (Alcocer Quinteros et al., 2020b) Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo – Ecuador Revista de Ciencias Sociales
- 7 (Aljuneidi & Bulgak, 2016) A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems International Journal of Advanced Manufacturing Technology
- 8 (Alves, 2013) A mathematical approach to find long-term strategies for the implementation of resource-orientated sanitation Water Science and Technology
- 9 (Andiappan et al., 2019) Design, optimisation and reliability allocation for energy systems based on equipment function and operating capacity Heliyon
- 10 (Arabsheybani et al., 2018) An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk Journal of Cleaner Production
- 11 (Banasik et al., 2017) Assessing alternative production options for eco-efficient food supply chains using multi-objective optimization Annals of Operations Research
- 12 (Bedoić et al., 2021) Synergy between feedstock gate fee and power-to-gas: An energy and economic analysis of renewable methane production in a biogas plant Renewable Energy

- 13 (Beheshtinia & Fathi, 2023) Cadena de suministro sostenible y energéticamente eficiente en la industria manufacturera Energy Science and Engineering
Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry
- 14 (Beheshtinia et al., 2021) Supply chain optimization considering sustainability aspects Sustainability (Switzerland)
- 15 (Boukherroub et al., 2015) An integrated approach for sustainable supply chain planning Computers and Operations Research
- 16 (Carrero-Parreño et al., 2017) Optimal Pretreatment System of Flowback Water from Shale Gas Production Industrial and Engineering Chemistry Research
- 17 (Casla et al., 2022) Optimal Day Ahead Planning and Bidding Strategy of Battery Storage Unit Participating in Nordic Frequency Markets IEEE Access
- 1 (Cayir Ervural et al., 2018) A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning Renewable Energy
- 19 (Chen & Tung, 2007) New criteria for sustainable water quality management Journal of the American Water Resources Association
- 20 (Cheraghalipour & Farsad, 2018) A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under disruption risks: A case study in plastic industry Computers and Industrial Engineering

- 21 (Chin et al., 2019) Simultaneous water and energy Resources, Conservation and Recycling
integration with isothermal and non-
isothermal mixing – A P-graph
approach
- 22 (Chiu et al., 2021) Applying DFA and goal Research in
programming to improve economic Engineering
efficiency, material handling Design
convenience, and sustainability of a
product packaging system
- 23 (Costa et al., 2017) A decisional simulation- Journal of Cleaner
optimization framework for Production
sustainable facility location of a
biodiesel plant in Colombia
- 24 (Das et al., 2023) A review of open pit mine and waste Resources Policy
dump schedule planning
- 25 (De et al., 2020) Hybridizing basic variable IEEE Transactions
neighborhood search with particle on Intelligent
swarm optimization for solving Transportation
sustainable ship routing and bunker Systems
management problem
- 26 (De et al., 2017) Sustainable maritime inventory Engineering
routing problem with time window Applications of
constraints Artificial
Intelligence
- 27 (De et al., 2016) Composite particle algorithm for Computers and
sustainable integrated dynamic ship Industrial
routing and scheduling optimization Engineering
- 28 (Dehaghi & Khoshfetrat, 2020) AHP-GP approach by considering Periodica
the leopold matrix for sustainable Polytechnica Civil
water reuse allocation: Najafabad Engineering
case study, Iran
- 29 (Dulebenets, 2022) Multi-objective collaborative Journal of Cleaner
agreements amongst shipping lines Production

- and marine terminal operators for sustainable and environmental-friendly ship schedule design
- 30 (Farazmand et al., 2022) Green dynamic multimodal logistics network design problem considering financing decisions: a case study of cement logistics Environmental Science and Pollution Research
- 31 (Florez & Castro-Lacouture, 2013) Optimization model for sustainable materials selection using objective and subjective factors Materials and Design
- 32 (França et al., 2022) Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review Trees, Forests and People
- 33 (Galindro et al., 2020) A Mathematical Model for Vineyard Replacement with Nonlinear Binary Control Optimization Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity
- 34 (Goodarzian et al., 2020) A multi-objective sustainable medicine supply chain network design using a novel hybrid multi-objective metaheuristic algorithm International Journal of Engineering, Transactions A: Basics
- 35 (Goodarzian et al., 2023) Hybrid meta-heuristic algorithms for optimising a sustainable agricultural supply chain network considering CO2 emissions and water consumption International Journal of Systems Science: Operations and Logistics
- 36 (Gutiérrez Franco et al., 2010) Planificación integrada de producción y distribución para un conglomerado industrial Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia
- 37 (Harijani et al., 2023) Closed-loop supply network of electrical and electronic equipment under carbon tax policy Environmental Science and Pollution Research

- 38 (Harraz & Galal, 2011) Design of Sustainable End-of-life Vehicle recovery network in Egypt Ain Shams Engineering Journal
- 39 (Heidari-Fathian & Pasandideh, 2018) Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation Computers and Industrial Engineering
- 40 (Hosseini-Motlagh et al., 2020) A novel hybrid approach for synchronized development of sustainability and resiliency in the wheat network Computers and Electronics in Agriculture
- 41 (How et al., 2016) Transportation decision tool for optimisation of integrated biomass flow with vehicle capacity constraints Journal of Cleaner Production
- 42 (Hu et al., 2016) Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity-efficiency tradeoff Resources, Conservation and Recycling
- 43 (Jabarzadeh et al., 2020) A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network Management of Environmental Quality: An International Journal
- 44 (Jian et al., 2019) Comparative study on optimum production decision of enterprise under the carbon quota mechanism based on historical emissions (An environmental perspective) Journal of Environmental Protection and Ecology
- 45 (Kalitventzeff et al., 2001) Better solutions for process sustainability through better insight in process energy Applied Thermal Engineering

- 46 (Kumari & Bera, 2022) A decision analysis model for reducing carbon emission from coal-fired power plants and its compensatory units Journal of Environmental Management
- 47 (Latinopoulos, 2005) Derivation of irrigation water demand functions through linear and non-linear optimisation models: Application to an intensively irrigated area in northern Greece Water Science and Technology: Water Supply
- 48 (Li et al., 2022) An adaptive heuristic algorithm based on reinforcement learning for ship scheduling optimization problem Ocean and Coastal Management
- 49 (Mahjoub & Sahebi, 2020) The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model Ecological Indicators
- 50 (Mamashli et al., 2021) Designing a sustainable–resilient disaster waste management system under hybrid uncertainty: A case study Engineering Applications of Artificial Intelligence
- 51 (Ming et al., 2014) Reducing carbon emission of ocean shipments by optimizing container size selection IEEE International Conference on Automation Science and Engineering
- 52 (Mirdar Harijani & Mansour, 2022) Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste – A case study in Tehran Journal of Cleaner Production
- 53 (Mirdar Harijani et al., 2017) Municipal solid waste recycling network with sustainability and supply uncertainty considerations Sustainable Cities and Society

- 54 (Mirzoieva et al., 2021) Optimization of the sown areas structure as a tool for the development of medicinal crop production on the basis of sustainability and regenerative agriculture E3S Web of Conferences
- 55 (Momenitabar et al., 2022) Designing a sustainable closed-loop supply chain network considering lateral resupply and backup suppliers using fuzzy inference system Environment, Development and Sustainability
- 56 (Monge et al., 2013) Impacto de la Manufactura Esbelta, Manufactura Sustentable y Mejora Continua en la Eficiencia Operacional y Responsabilidad Ambiental en México Información Tecnológica
- 57 (Motevalli-Taher et al., 2020) Wheat sustainable supply chain network design with forecasted demand by simulation Computers and Electronics in Agriculture
- 58 (Mrabti et al., 2021) The pooling of sustainable freight transport Journal of the Operational Research Society
- 59 (Mukhopadhyay & Sinha, 2006) A techno-economic model for optimum regeneration of surface mined land Environmental Geology
- 60 (Nayeri et al., 2020) Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design Computers and Industrial Engineering
- 61 (Niranjan et al., 2019) Designing a omnichannel closed loop green supply chain network adapting preferences of rational customers Sadhana - Proceedings in

			Engineering Sciences
62	(Nour et al., 2017)	Energy-based aggregate production planning for porcelain tableware manufacturer in Egypt	Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management
63	(Nujoom et al., 2018)	A sustainable manufacturing system design: A fuzzy multi-objective optimization model	Environmental Science and Pollution Research
64	(Nunes & Silva, 2023)	Optimization of the Residual Biomass Supply Chain: Process Characterization and Cost Analysis	Logistics
65	(Okoye et al., 2015)	Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach	Resources, Conservation and Recycling
66	(Oliveira et al., 2023)	Self-Sustainability Assessment for a High Building Based on Linear Programming and Computational Fluid Dynamics	Algorithms
67	(Orjuela-Castro et al., 2019)	Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia	Computers and Electronics in Agriculture
68	(Osmani & Zhang, 2017)	Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain – A logistic case study in Midwestern United States	Land Use Policy

- 69 (Osmani & Zhang, 2013) Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties Energy
- 70 (Oudani et al., 2023) Green Blockchain based IoT for secured supply chain of hazardous materials Computers and Industrial Engineering
- 71 (Oudani, 2023) A combined multi-objective multi-criteria approach for blockchain-based synchromodal transportation Computers and Industrial Engineering
- 72 (Pati & Vrat, 2010) Economic paper blending optimization model with competing materials Management of Environmental Quality: An International Journal
- 73 (Pourjavad & Mayorga, 2018) Optimization of a sustainable closed loop supply chain network design under uncertainty using multi-objective evolutionary algorithms Optimization of a sustainable closed loop supply chain network design under uncertainty using multi-objective evolutionary algorithms
- 74 (Prajapati et al., 2022) Sustainable Agro-Food Supply Chain in E-Commerce: Towards the Circular Economy Sustainability (Switzerland)
- 75 (Puchongkawarin & Mattaraj, 2020) Development of a superstructure optimization framework for the design of municipal solid waste facilities Sustainable Environment Research

- 76 (Rajak et al., 2022) Multi-objective mixed-integer linear optimization model for sustainable closed-loop supply chain network: a case study on remanufacturing steering column Environment, Development and Sustainability
- 77 (Rajput & Singh, 2022) Modelo de Industria 4.0 para una red integrada de economía circular y logística inversa International Journal of Logistics Research and Applications Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network
- 78 (Ransikarbun & Pitakaso, 2024) Multi-objective optimization design of sustainable biofuel network with integrated fuzzy analytic hierarchy process Expert Systems with Applications
- 79 (Resat & Unsal, 2019) A novel multi-objective optimization approach for sustainable supply chain: A case study in packaging industry Sustainable Production and Consumption
- 80 (Sacchelli et al., 2014) Matching socio-economic and environmental efficiency of wood-residues energy chain: A partial equilibrium model for a case study in Alpine area Journal of Cleaner Production
- 81 (Sarkar et al., 2017) Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items Computers and Industrial Engineering
- 82 (Sarkar et al., 2018) A multi-objective optimization of energy, economic, and carbon emission in a production model under sustainable supply chain management Applied Sciences (Switzerland)

- 83 (Sazvar et al., 2021) A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain Computers and Industrial Engineering
- 84 (Shabbar & Sayama, 2023) Health information exchange network under collaboration, cooperation, and competition: A game-theoretic approach Health Care Management Science
- 85 (Shahinzadeh et al., 2018) Optimal Energy Scheduling for a Microgrid Encompassing DRRs and Energy Hub Paradigm Subject to Alleviate Emission and Operational Costs Proceedings - 2018 Smart Grid Conference, SGC 2018
- 86 (Sharma et al., 2021) Impact factor improvement and maintenance schedule optimisation of mining shovels by remaining useful life and linear programming Journal of Mines, Metals and Fuels
- 87 (Stewart & Martel, 1995) Application of a bioeconomic strategic planning model to an industrial forest in saskatchewan Water, Air, & Soil Pollution
- 88 (Tan et al., 2019) Optimization models for financing innovations in green energy technologies Renewable and Sustainable Energy Reviews
- 89 (Tascione et al., 2021) A proposal of an economic optimization model for sustainable waste management Journal of Cleaner Production
- 90 (Taskhiri et al., 2011) Energy-based fuzzy optimization approach for water reuse in an eco-industrial park Resources, Conservation and Recycling
- 91 (Theo et al., 2016) An MILP model for cost-optimal planning of an on-grid hybrid power system for an eco-industrial park Energy

- 92 (Tirkolaee et al., 2022) Designing a sustainable closed-loop supply chain network of face masks during the COVID-19 pandemic: Pareto-based algorithms Journal of Cleaner Production
- 93 (Vali-Siar & Roghanian, 2022) Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption Sustainable Production and Consumption
- 94 (Vivas et al., 2020) Integrated method combining analytical and mathematical models for the evaluation and optimization of sustainable supply chains: A Brazilian case study Computers and Industrial Engineering
- 95 (Xu et al., 2020) Energy efficiency optimization for ecological 3D printing based on adaptive multi-layer customization Journal of Cleaner Production
- 96 (Yang et al., 2023) A Coordination Optimization for Train Operation and Energy Infrastructure Control in a Metro System IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems
- 97 (Yousefi Yegane et al., 2016) A non-linear integer bi-level programming model for competitive facility location of distribution centers International Journal of Engineering, Transactions B: Applications
- 98 (Zhang et al., 2013) An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain Applied Energy
- 99 (Z. Zhang et al., 2020) Multi-objective parameter optimization to support energy-efficient peck deep-hole drilling processes with twist drills International Journal of Advanced

Nota: La presente tabla muestra los artículos encantados con las cadenas de búsqueda **Fuente:** Elaboración propia

La tabla proporciona una visión general de la investigación relacionada con modelos matemáticos de optimización basados en objetivos ambientales, específicamente en el contexto de la industria manufacturera en Ecuador. Se analiza algunas observaciones en la tabla con respecto a los datos encontrados

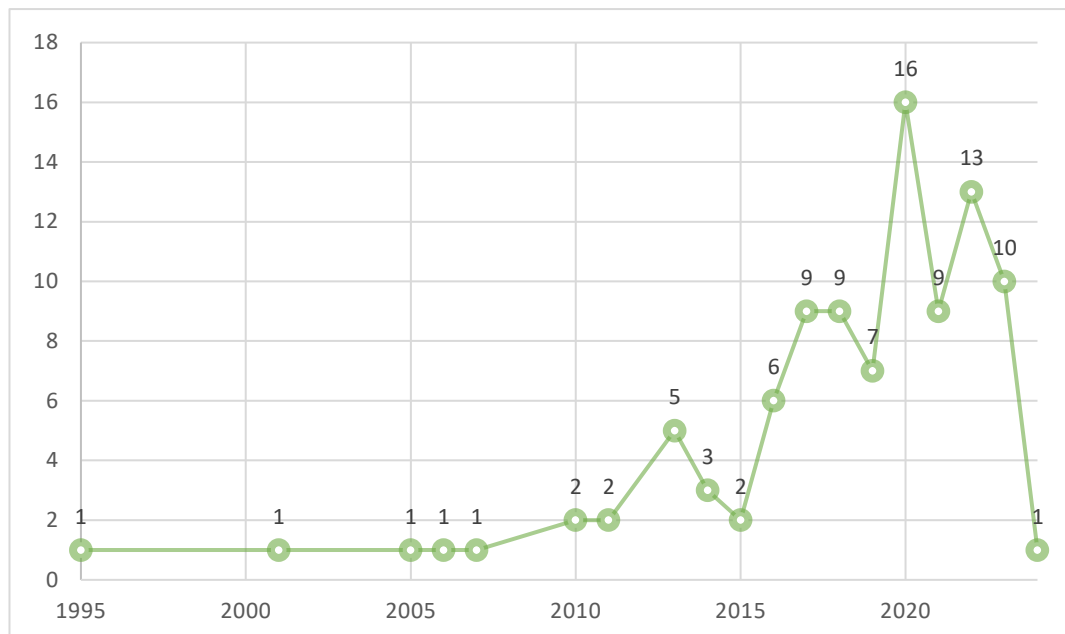
Temas de Investigación Diversificados: La tabla abarca una variedad de temas relacionados con la optimización y los objetivos ambientales, como la configuración de sistemas de fabricación, la producción de energía renovable, la planificación sostenible de sistemas de suministro de agua, y la gestión de residuos sólidos urbanos.

Amplitud de Revistas y Temáticas: La investigación se ha publicado en revistas que cubren diversas áreas, desde tecnología de fabricación (CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, International Journal of Advanced Manufacturing Technology) hasta temas más amplios como energía, medio ambiente y gestión de recursos (Journal of Hydro-Environment Research, Water Science and Technology).

La tabla aborda temas relacionados con la sostenibilidad y la optimización, la falta de un enfoque específico en la industria manufacturera del Ecuador podría señalar una brecha en la investigación específica para este sector en el país.

Figura 3

Cronología de publicaciones



Nota: La figura muestra como a lo largo de los años se han publicado artículos relacionados a Modelos matemáticos con respecto a objetivos ambientales Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se demuestra un resumen del número de publicaciones en varios años. Aquí se presentan algunas observaciones y tendencias:

Tendencias de publicaciones: Ha habido un aumento progresivo en el número de publicaciones a lo largo de los años, con un pico significativo en 2020, donde se enumeraron 16 publicaciones. Este aumento puede indicar un mayor interés en el tema o una mayor actividad de investigación en el campo.

Consistencia en los últimos años: 2017, 2018, 2021 y 2022 muestran cifras relativamente consistentes, con 9 publicaciones cada año, lo que demuestra la estabilidad de la producción investigativa durante este período.

Año de Mayor Producción: El año con mayor número de publicaciones fue 2020, seguido de 2018, 2017 y 2022. En estos años se pueden presentar ciertos eventos o desarrollos que estimulen la investigación en esta área.

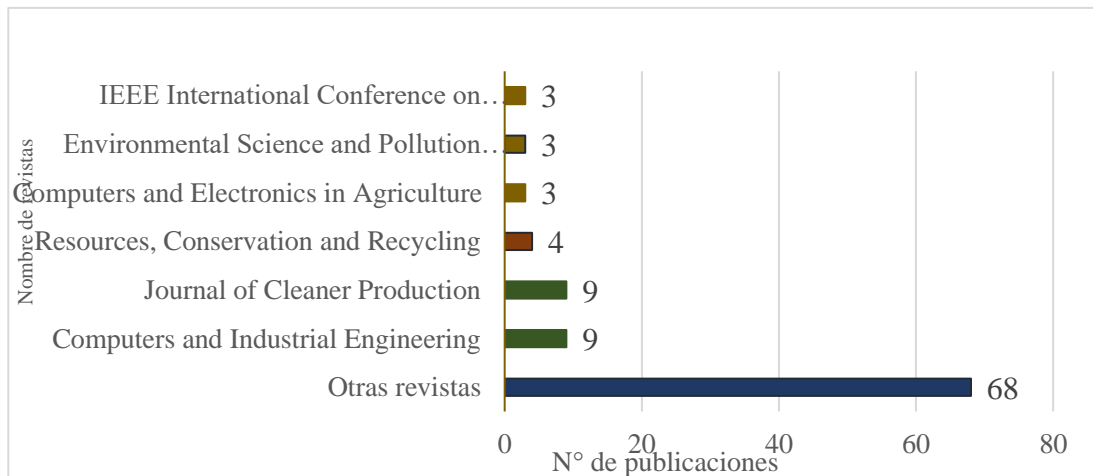
Años de menor producción: A la fecha 1995 y 2001 tuvieron cada uno una sola publicación, lo que indica una actividad limitada en esos años en temas de interés.

Años recientes como foco principal: La mayor concentración de publicaciones parece haberse dado en los últimos años, especialmente desde 2017 hasta la actualidad. Esto puede deberse a una mayor conciencia de la importancia del tema o a la evolución de nuevos campos de investigación relacionados.

Este análisis cuantitativo proporciona una visión general de la evolución temporal de la investigación sobre un tema en particular.

Figura 4

Revistas con mayores artículos publicadas



Nota: La figura muestra a las revistas que han realizado mayores publicaciones con respecto al tema **Fuente:** Elaboración propia

En la siguiente tabla se puede visualizar las revistas donde las cuales se han publicado artículos relacionados con programación lineal, optimización y sostenibilidad. Para analizar los datos proporcionados sobre las revistas y el número de publicaciones, podemos observar algunas tendencias y resaltar información relevante:

La mayoría de las publicaciones se encuentran en "Otras revistas" con un total de 68 publicaciones.

Las revistas con mayor número de publicaciones son "Informática e Ingeniería Industrial" y "Revista de Producción Más Limpia", ambas con 9 publicaciones cada una.

La concentración de publicaciones en unas pocas revistas sugiere que son importantes

en el contexto del análisis.

Revistas relevantes: “Computers and Industrial Engineering” y “Journal of Cleaner Production” son revistas destacadas con 9 publicaciones cada una. Estas pueden ser áreas de interés importantes o pueden estar relacionadas con el tema de estudio.

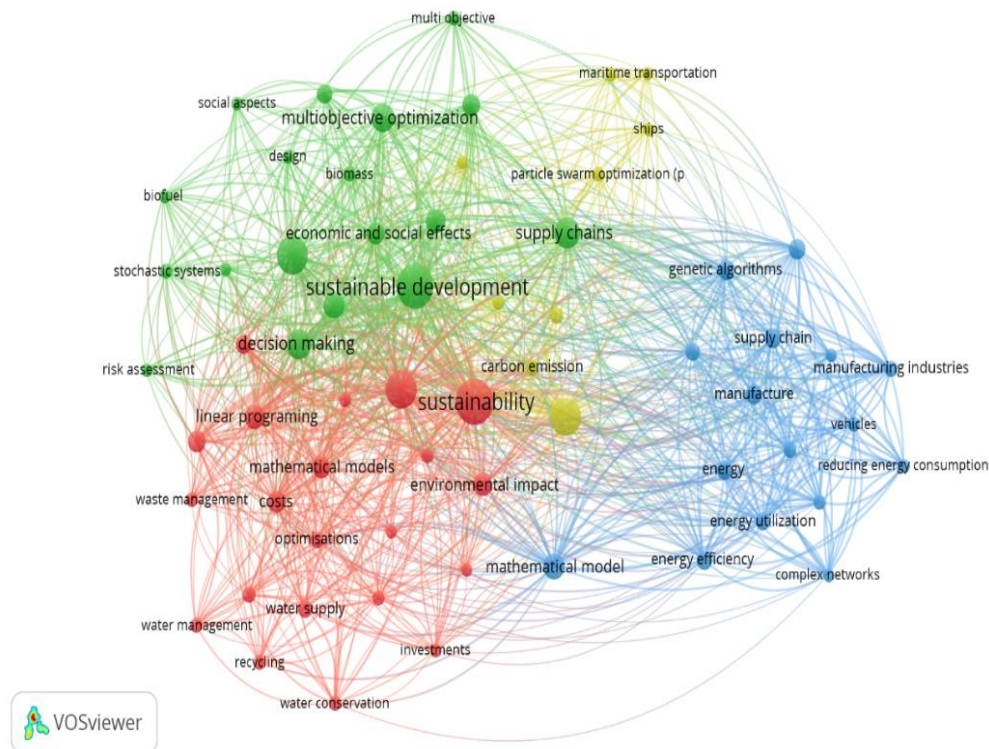
El hecho de que haya 68 publicaciones en Otras Revistas sugiere una diversidad de fuentes. Sería interesante investigar qué revistas entran en esta categoría y si existen tendencias o patrones en sus temas.

Otras revistas tienen un promedio de menos de 7 publicaciones cada una (68 publicaciones/número de otras revistas). En contraste, “Computación e Ingeniería Industrial” y “Revista de Producción Más Limpia” tienen una frecuencia promedio de 9 publicaciones cada una.

La presencia de la “Conferencia Internacional IEEE sobre Ciencia e Ingeniería de Automatización” con tres publicaciones sugiere que los eventos de la conferencia hacen una contribución significativa a la investigación.

Figura 5

Diagrama de VOSviewer



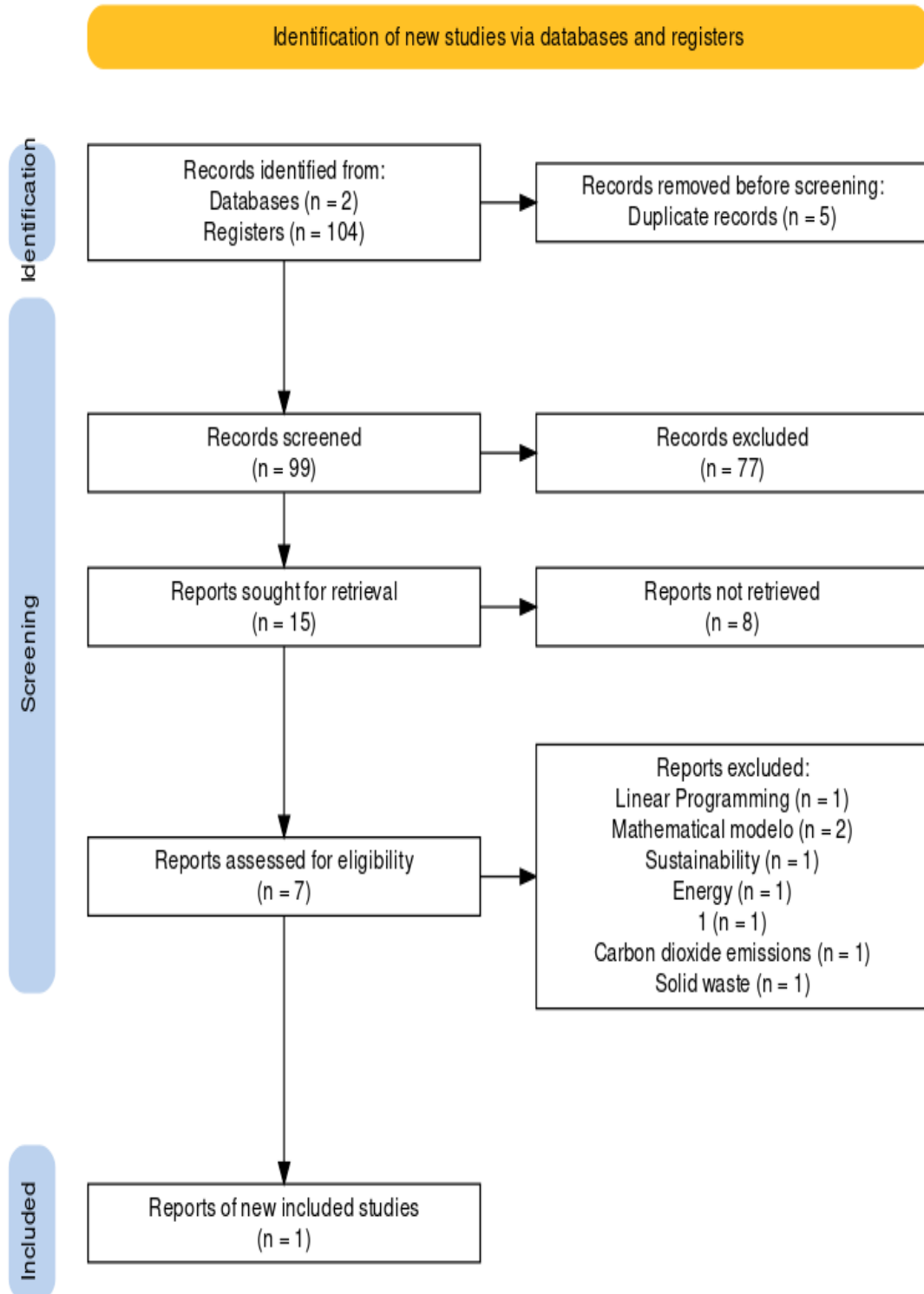
Nota: En la siguiente figura se muestra las palabras claves para la selección de los artículos. **Fuente:** VOSviewer

El análisis de un diagrama de VOSviewer se proporciona información sobre las relaciones y conexiones entre términos clave. Se realizó un análisis de las palabras mencionadas: "modelos matemáticos", "sostenibilidad", "programación lineal", "optimización", "industria manufacturera, "desarrollo sostenible".

Este análisis sugiere un enfoque que combina la modelización matemática y la optimización para abordar cuestiones específicas en la industria manufacturera, con un énfasis en la sostenibilidad.

Figura 6

Diagrama de flujo PRISMA



Nota. El diagrama de flujos es la representación exacta de cómo está compuesto el análisis bibliométrico. **Fuente:** PRISMA

El diagrama de flujo presentado a continuación fue diseñado a partir de la herramienta PRISMA, su función principalmente es las revisiones sistemáticas.

Se registró, dos bases de datos (Scopus y Scielo) y 104 artículos científicos, los mismos que fueron importados a la plataforma de Mendeley dando como resultado registros eliminados antes de la sección de registros de duplicados que son 5 artículos, estos se exportaron en una sola base de datos de Research Information Systems (RIS) dando como resultado 99 artículos para examinar, los cuales 77 artículos se excluidos. Después quedaron 22 artículos lo cuales se realizo un informa para excluir los que no cumplían los criterios para su elegibilidad, estos fueron: programación lineal, modelo matemático, sostenibilidad, energía, emisiones de dióxido de carbono, residuos solidos y aguas residuales.

Con este análisis se logró un informe evaluado para determinar su elegibilidad, mostrando 7 artículos seleccionados cumpliendo con los criterios que facilitaron la correcta selección con los cuales se trabaja para obtener un modelo matemático de optimización.

El proceso sigue las pautas PRISMA para la identificación, selección y exclusión de estudios de manera sistemática.

La exclusión de estudios establecidos en temas específicos indica un enfoque selectivo según los criterios de la revisión dando por la cadena de búsqueda.

También muestra la recuperación de solo 1 nuevo estudio el cual puede indicar la necesidad de ampliar las estrategias de búsqueda o ajustar los criterios de inclusión para que su selección sea más amplia

El análisis proporciona una visión general del proceso de revisión sistemática realizado mediante PRISMA, destacando los pasos clave y los resultados obtenidos en cada etapa para lograr la obtención de los artículos científicos mas acordes para la elección del modelo matemático.

4.1.2 Análisis multicriterio

Cumplimiento del objetivo 2: Categorizar los criterios de modelización basados en sostenibilidad ambiental que se ajusten al modelo matemático de optimización.

En este objetivo específico se desglosa los artículos científicos seleccionados a partir del objetivo uno.

Tabla 6

Criterios de modelización

Modelo	Autor	Tema	Objetivos ambientales			Enfoque modelado	Enfoque de solución	Tipo de industria	Software
			Emisiones de CO ₂	Aguas residuales	Residuos sólidos				
M-01	(Alcocer Quinteros et al., 2020b)	Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo – Ecuador		x		Modelo matemático multicriterio	Modelo de Promoción lineal	Domiciliarios, comerciales e industriales Mezclados en una zona urbana	Software General Algebraic Modeling System (GAMS)
M-02	(Beheshtinia & Fathi, 2023)	Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry				Modelo de optimización	Modelo de programación lineal entera mixta	Producción y transporte	LINGO

M-03	(Dehaghi & Khoshfetrat, 2020)	AHP-GP approach by considering the leopold matrix for sustainable water reuse allocation: Najafabad case study, Iran		x		x	Modelo de programación lineal entera mixta	Agricultura e industria	LINGO
M-04	(Jabarzadeh et al., 2020)	A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network	x				Optimización	Agrícola	Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS) MINMAX
M-05	(Mahjoub & Sahebi, 2020)	The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model		x		x	Optimización	Energetica	
M-06	(Oliveira et al., 2023)	Self-Sustainability Assessment for a High Building Based				x	Modelo de programación lineal		Ansys Fluent

M-07	(Rajak et al., 2022)	on Linear Programming and Computational Fluid Dynamics Multi-objective mixed-integer linear optimization model for sustainable closed-loop supply chain network: a case study on remanufacturing steering column	x	Optimización	Programación lineal entera mixta	Mnufacturera	Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS)
------	----------------------	--	---	--------------	----------------------------------	--------------	---

Nota. En la tabla se muestra los criterios de modelización abarcados y distribuidos en cada modelo de optimización. *Elaborado por:* Vaca, (2024).

En la tabla se muestra los modelos seleccionados donde determinan los distintos problemas ambientales, estos son: emisiones de CO2, aguas residuales, residuos sólidos y energía. Además, se utilizó diversos enfoques de modelado y software utilizados en cada estudio para proporcionar soluciones a estos problemas, y por ende, contribuye al campo de la investigación ambiental y sostenibilidad.

Tabla 7

Categorización de los modelos

Objetivos ambientales				Enfoque de solución
Emisiones de CO ₂	Aguas residuales	Residuos solidos	Energía	
	M-03 M-05			Modelo de programación lineal entera mixta
M-04				Modelo de programación lineal entera mixta
		M-01 M-07		Modelo de programación lineal entera mixta
			M-02 M-03 M-05 M-06	Modelo de programación lineal entera mixta

Nota. En esta tabla se muestra la categorización de los modelos de optimización según su objetivo ambiental. *Elaborado por:* Vaca, (2024)

La información proporcionada en la tabla muestra a los modelos asignados en cada objetivo ambiental y el enfoque de solución utilizado en diferentes modelos ambientales.

Además, Los modelos analizados en la tabla utilizan enfoques de programación lineal entera mixta para abordar diversos objetivos ambientales, lo que demuestra la eficacia y flexibilidad de estos enfoques para resolver problemas ambientales

Tabla 8

Parámetros de modelización

Modelo	Parámetros de modelado	Función objetivo	Variables de decisión	Restricción	Modelización
M-01	<p>Xijp: Cantidad de RSU a trasladar en el camión p desde el destino final de la ruta de recolección i al centro de separación j en el período.</p> <p>Xjkqv: Cantidad de productos v a trasladar en el camión q desde el centro de separación j al centro de tratamiento k en el período.</p> <p>Xjlt: Cantidad de productos a trasladar en el camión t desde el centro de separación j al centro de compostaje l en el período.</p> <p>Xjmw: Cantidad de RSU no</p>	<p>Z1= minimización de los costos involucrados en las operaciones y transporte de los RSU</p> <p>Z2= minimización del uso de los camiones y las distancias recorridas</p> <p>Z3= maximización del servicio prestado</p> <p>Z4= impacto ambiental</p>	<p>Xijp: Cantidad de RSU a trasladar en el camión p desde el destino final de la ruta de recolección i al centro de separación j en el período.</p> <p>Xjkqv: Cantidad de productos v a trasladar en el camión q desde el centro de separación j al centro de tratamiento k en el período.</p> <p>Xjlt: Cantidad de productos a trasladar en el camión t desde el centro de separación j al centro de compostaje l en el período.</p> <p>Xjmw: Cantidad de RSU no</p>	<p>I: Sitios de generación</p> <p>J: Centros de separación</p> <p>K: Centros de tratamiento</p> <p>L: Centros de compostaje</p> <p>M: Relleno sanitario</p> <p>O: Clientes de los productos tratados</p> <p>R: Clientes de los productos de compostaje</p> <p>P: Camiones de generación a separación</p> <p>Q: Camiones de Separación a centros de tratamiento</p> <p>T: Camiones de separación a compostaje</p> <p>S: Camiones de Tratamiento a clientes</p>	ANEXO 1

recuperables a trasladar en el camión w desde el centro de separación j al relleno sanitario m en el período

Xkosv: Cantidad de productos v tratados a trasladar en el camión s desde el centro de tratamiento k al cliente o en el período.

Xlru: Cantidad de productos de compostaje a trasladar en el camión u desde el centro de compostaje l al cliente r en el período.

Yijp: Variable binaria de uso del camión p para ir del sitio de recolección i al centro de separación j.

Yjkq: Variable binaria de uso del camión q para ir del centro de separación j al centro de tratamiento k.

recuperables a trasladar en el camión w desde el centro de separación j al relleno sanitario m en el período

Xkosv: Cantidad de productos v tratados a trasladar en el camión s desde el centro de tratamiento k al cliente o en el período.

Xlru: Cantidad de productos de compostaje a trasladar en el camión u desde el centro de compostaje l al cliente r en el período.

Yijp: Variable binaria de uso del camión p para ir del sitio de recolección i al centro de separación j.

Yjkq: Variable binaria de uso del camión q para ir del centro de separación j al centro de tratamiento k.

W: Camiones de Separación a relleno

Sanitario

U: Camiones de compostaje a clientes

V: Cantidad de productos de separación a centros de tratamientos

Yjmw: Variable binaria de uso del camión w para ir del centro de separación al relleno sanitario.

Yjlt: Variable binaria de uso del camión t para ir del centro de separación j al centro de compostaje l.

Ykos: Variable binaria de uso del camión s para ir del centro de tratamiento k a los clientes del centro de tratamiento.

Ylru: Variable binaria de uso del camión u para ir del centro de compostaje a los clientes de compostaje.

Cijp: Costo de transportación del m camión p para ir de la generación i al centro de separación j.

Cup: Costo de un viaje del camión p.

Yjmw: Variable binaria de uso del camión w para ir del centro de separación al relleno sanitario.

Yjlt: Variable binaria de uso del camión t para ir del centro de separación j al centro de compostaje l.

Ykos: Variable binaria de uso del camión s para ir del centro de tratamiento k a los clientes del centro de tratamiento.

Ylru: Variable binaria de uso del camión u para ir del centro de compostaje a los clientes de compostaje.

Cijp: Costo de transportación del m camión p para ir de la generación i al centro de separación j.

Cup: Costo de un viaje del camión p.

Cj: Costos de operación del centro de separación j.

Cjkqv: Costos de trasportación del camión q para ir del centro de separación j al centro de tratamiento k.

Cuq: Costo de un viaje del camión q.

Ck: Costos de operación del centro de tratamiento k.

Cjlt: Costos de transportación del camión t para ir del centro de separación j al centro de compostaje l.

Cut: Costo de un viaje del camión t.

Cl: Costos de operación del centro de compostaje l.

Cjmw: Costos de transportación del camión w para ir del centro de separación j al relleno sanitario m.

Cj: Costos de operación del centro de separación j.

Cjkqv: Costos de trasportación del camión q para ir del centro de separación j al centro de tratamiento k.

Cuq: Costo de un viaje del camión q.

Ck: Costos de operación del centro de tratamiento k.

Cjlt: Costos de transportación del camión t para ir del centro de separación j al centro de compostaje l.

Cut: Costo de un viaje del camión t.

Cl: Costos de operación del centro de compostaje l.

Cjmw: Costos de transportación del camión w para ir del centro de separación j al relleno sanitario m.

Cuw: Costo de un viaje del camión w.

Ckosv: Costos de transportación del camión s para ir del centro de tratamiento k a los clientes de tratamiento o.

Cus: Costo de un viaje del camión s.

Clru: Costos de transportación del camión u para ir del centro de compostaje l a los clientes de compostaje r.

Cuu: Costo unitario del camión u.

dijp: Distancia a recorrer el camión p entre el sitio de generación i al centro de separación j.

djkq: Distancia a recorrer el camión q entre en centro de separación j al centro de tratamiento k.

Cuw: Costo de un viaje del camión w.

Ckosv: Costos de transportación del camión s para ir del centro de tratamiento k a los clientes de tratamiento o.

Cus: Costo de un viaje del camión s.

Clru: Costos de transportación del camión u para ir del centro de compostaje l a los clientes de compostaje r.

Cuu: Costo unitario del camión u.

dijp: Distancia a recorrer el camión p entre el sitio de generación i al centro de separación j.

djkq: Distancia a recorrer el camión q entre en centro de separación j al centro de tratamiento k.

djmw: Distancia a recorrer el camión w entre el centro de separación j y el relleno sanitario m.

djlt: Distancia a recorrer el camión t entre el centro de separación j el centro de compostaje.

dkos: Distancia a recorrer el camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de m tratamiento o.

dlru: Distancia a recorrer el camión u entre el centro de compostaje l al cliente de compostaje r.

CSj: Capacidad del centro de separación j.

CTk: Capacidad del centro de tratamiento k.

CCI: Capacidad del centro de compostaje.

CRSm: Capacidad del relleno sanitario m.

djmw: Distancia a recorrer el camión w entre el centro de separación j y el relleno sanitario m.

djlt: Distancia a recorrer el camión t entre el centro de separación j el centro de compostaje.

dkos: Distancia a recorrer el camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de m tratamiento o.

dlru: Distancia a recorrer el camión u entre el centro de compostaje l al cliente de compostaje r.

CSj: Capacidad del centro de separación j.

CTk: Capacidad del centro de tratamiento k.

CCI: Capacidad del centro de compostaje.

CRSm: Capacidad del relleno sanitario m.

DCo: Demanda de los clientes de tratamiento o.

DCr: Demanda de los clientes de compostaje r.

CVijp: Cantidad de viajes en el período del camión p desde el centro de generación i al sitio de separación j.

CVjkqv: Cantidad de viajes en el período del camión q desde el centro de separación j al centro de tratamiento k de los productos v.

CVjlt: Cantidad de viajes en el período del camión t desde el centro de separación j al centro de compostaje l.

CVjmw: Cantidad de viajes en el período del camión w desde el centro de separación j al relleno sanitario m.

DCo: Demanda de los clientes de tratamiento o.

DCr: Demanda de los clientes de compostaje r.

CVijp: Cantidad de viajes en el período del camión p desde el centro de generación i al sitio de separación j.

CVjkqv: Cantidad de viajes en el período del camión q desde el centro de separación j al centro de tratamiento k de los productos v.

CVjlt: Cantidad de viajes en el período del camión t desde el centro de separación j al centro de compostaje l.

CVjmw: Cantidad de viajes en el período del camión w desde el centro de separación j al relleno sanitario m.

CVkosv: Cantidad de viajes en el período del camión s desde el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o de los productos v.

CVlru: Cantidad de viajes en el período del camión u desde el centro de compostaje l al cliente de compostaje r.

Cp: Capacidad del camión p en un viaje.

Cq: Capacidad del camión q en un viaje.

Ct: Capacidad del camión t en un viaje.

Cw: Capacidad del camión w en un viaje.

Cs: Capacidad del camión s en un viaje.

Cu: Capacidad del camión u en un viaje.

Tt: Tiempo del período de trabajo.

CVkosv: Cantidad de viajes en el período del camión s desde el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o de los productos v.

CVlru: Cantidad de viajes en el período del camión u desde el centro de compostaje l al cliente de compostaje r.

Cp: Capacidad del camión p en un viaje.

Cq: Capacidad del camión q en un viaje.

Ct: Capacidad del camión t en un viaje.

Cw: Capacidad del camión w en un viaje.

Cs: Capacidad del camión s en un viaje.

Cu: Capacidad del camión u en un viaje.

Tt: Tiempo del período de trabajo.

tcpi: Tiempo de carga del camión p en el sitio de generación i.

tdpj: Tiempo de descarga del camión p en el sitio de separación j.

tpij: Tiempo de traslado del camión p entre el sitio de generación i al sitio de separación j.

Vpij: Velocidad promedio del camión p entre el sitio de generación i al sitio de separación j.

tcqj: Tiempo de carga del camión q en el sitio de separación j.

tdqk: Tiempo de descarga del camión q en el sitio de tratamiento k.

tqjk Tiempo de traslado del camión q entre el sitio de separación j al centro de tratamiento k.

tcpi: Tiempo de carga del camión p en el sitio de generación i.

tdpj: Tiempo de descarga del camión p en el sitio de separación j.

tpij: Tiempo de traslado del camión p entre el sitio de generación i al sitio de separación j.

Vpij: Velocidad promedio del camión p entre el sitio de generación i al sitio de separación j.

tcqj: Tiempo de carga del camión q en el sitio de separación j.

tdqk: Tiempo de descarga del camión q en el sitio de tratamiento k.

tqjk Tiempo de traslado del camión q entre el sitio de separación j al centro de tratamiento k.

Vqjk: Velocidad promedio del camión q entre el sitio de separación j al centro de tratamiento k.

tctj: Tiempo de carga del camión t en el sitio de separación j.

tdtl: Tiempo de descarga del camión t en el centro de compostaje l.

ttjl: Tiempo de traslado del camión l entre el sitio de separación j al centro de compostaje l.

Vtjl: Velocidad promedio del camión t entre el sitio de separación j al centro de compostaje l.

tcwj: Tiempo de carga del camión w en el sitio de separación j. Biodiesel producido a partir de Jatropha en el sitio de producción p en el período t

Vqjk: Velocidad promedio del camión q entre el sitio de separación j al centro de tratamiento k.

tctj: Tiempo de carga del camión t en el sitio de separación j.

tdtl: Tiempo de descarga del camión t en el centro de compostaje l.

ttjl: Tiempo de traslado del camión l entre el sitio de separación j al centro de compostaje l.

Vtjl: Velocidad promedio del camión t entre el sitio de separación j al centro de compostaje l.

tcwj: Tiempo de carga del camión w en el sitio de separación j. Biodiesel producido a partir de Jatropha en el sitio de producción p en el período t

tdwm: Tiempo de descarga del camión w en el relleno sanitario m.

twjm: Tiempo de traslado del camión w entre el sitio de separación j y el relleno sanitario m.

Vwjm: Velocidad promedio del camión w entre el sitio de separación j y el relleno sanitario m.

tcsk: Tiempo de carga del camión s en el centro de tratamiento k.

tdso: Tiempo de descarga del camión s en el cliente de tratamiento o.

tsko: Tiempo de traslado del camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o.

Vsko: Velocidad promedio del camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o.

tdwm: Tiempo de descarga del camión w en el relleno sanitario m.

twjm: Tiempo de traslado del camión w entre el sitio de separación j y el relleno sanitario m.

Vwjm: Velocidad promedio del camión w entre el sitio de separación j y el relleno sanitario m.

tcsk: Tiempo de carga del camión s en el centro de tratamiento k.

tdso: Tiempo de descarga del camión s en el cliente de tratamiento o.

tsko: Tiempo de traslado del camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o.

Vsko: Velocidad promedio del camión s entre el centro de

	<p>tcu_l: Tiempo de carga del camión u en el centro de compostaje l.</p> <p>tdur: Tiempo de descarga del camión u en el cliente de compostaje r.</p> <p>tulr: tiempo de traslado del camión u entre el centro de compostaje l y el cliente de compostaje r.</p> <p>Vulr: Velocidad promedio del camión u entre el centro de compostaje y el cliente de compostaje r.</p>	<p>tratamiento k al cliente de tratamiento o.</p> <p>tcu_l: Tiempo de carga del camión u en el centro de compostaje l.</p> <p>tdur: Tiempo de descarga del camión u en el cliente de compostaje r.</p> <p>tulr: tiempo de traslado del camión u entre el centro de compostaje l y el cliente de compostaje r.</p> <p>Vulr: Velocidad promedio del camión u entre el centro de compostaje y el cliente de compostaje r.</p>			
M-02	<p>Size_j: Tamaño del pedido j</p> <p>Cap_m: Capacidad del vehículo m</p> <p>PR_s: Tasa de producción de proveedores s</p> <p>Pt_j: Tiempo de proceso del pedido j</p>	<p>minimizar el total de energía consumida para la producción por parte de los proveedores</p> <p>Maximizar la calidad de los pedidos</p>	<p>co_j: tiempo de finalización del pedido j en la etapa del proveedor.</p> <p>Delivery_j: Plazo de entrega del pedido j al fabricante</p>	<p>Cada pedido solo debe asignarse a un solo proveedor. Impide que se realicen órdenes asignados a proveedores inaceptables.</p> <p>Tiempo de finalización de cada pedido en el proveedor.</p>	ANEXO 2

VS_m : Velocidad media de desplazamiento del vehículo m

$disTS_s(disST_s)$: Distancia del fabricante al proveedor s (del proveedor al fabricante)

$disSS_{ss'}$: Distancia de los proveedores s a los proveedores s'

$Quality_{js}$: Calidad del pedido j si es procesado por proveedor.

SE_{js} : Consumo energético de los proveedores para orden de procesamiento j

VE_m : Consumo de combustible del vehículo m por cada recorrido unidad de distancia

Del_i : Plazo de entrega del paquete i al fabricante.

Un proveedor no puede procesar más de un pedido a la vez.

Elimina algunas variables redundantes.

Determina la hora de inicio del procesamiento para cada pedido.

Asigna un proveedor a cada paquete según sobre el proveedor asignado a su pedido correspondiente.

Paquete de un pedido, no se puede asignar a más de un lugar en una carga.

Cada lugar en el vehículo de un vehículo la carga no puede ser ocupada por dos bultos.

Espacio total ocupado por los bultos asignados en una carga no excede esa capacidad del vehículo.

Un paquete no está asignado al b th cargo quinta prioridad del vehículo m , entonces no se

$Load_i$: Tiempo de carga del paquete i en un vehículo

av_i : El tiempo que el vehículo está disponible para transportar el paquete i

$Arrive_{mb}$: Hora de llegada b th de la carga del m th

x_{si} : Es igual a 1, si el paquete i está asignado al proveedor s ; de lo contrario, es igual a 0

x_{sj} : Equals 1, if order j is assigned to supplier s ; otherwise, it equals 0

y_{jk} : Es igual a 1, si el orden se procesa antes que la k th pedido en la etapa de proveedor; de lo contrario es igual a 0

V_{mbip} : Es igual a 1, si la prioridad de transporte en la carga del vehículo k está

asigna ningún paquete al $p + 1$ th prioridad de esa carga.

relacionada con el bulto 1; de lo contrario, es igual a 0.
 rTS_{mbs} (rTS_{mbs}): Es igual a 1, si viaja el vehículo m en la carga del fabricante al proveedor (o de proveedores a productores); de lo contrario, es igual a 0
 $rSS_{mbs's}$: Es igual a 1, si viaja el vehículo m en carga de proveedores a proveedores'; de lo contrario, es igual a 0

M-03	<p>Peso por unidad de la desviación por exceso de rendimiento.</p> <p>peso por unidad de desviación por debajo del rendimiento</p> <p>peso que se utiliza para una desviación relativa del objetivo.</p>	<p>Maximizar los beneficios</p> <p>Minimizar los costos y los riesgos ambientales</p>	<p>Volumen máximo (l/s) de capacidad de producción de reutilización de agua.</p> <p>Volumen de asignación de reutilización (l/s) de alternativas factibles de reutilización del agua incluye: riego agrícola, paisaje urbano, riego y demanda industrial.</p>	ANEXO 3
------	--	---	---	---------

	contribución (constante) al objetivo i por unidad de actividad variable de actividad (decisión)			Volumen mínimo factible de agua, asignación de reutilización	
	constante que mide la meta del objetivo				
M-04	Costo fijo de abrir un centro de distribución de frutas Costo fijo de abrir un centro de compostaje. Costo de transporte por unidad de distancia por unidad de producto (\$/km.ton) Distancia desde la ubicación r hasta la ubicación Costo de mantenimiento por unidad de inventario del centro de distribución j en el momento t, (\$/tonelada)	- Minimizar el costo total - Maximizar la capacidad de respuesta a la demanda del cliente - Minimizar las emisiones totales de CO2	W_j : 1 si el centro de distribución j está abierto en la ubicación, 0 en caso contrario Y_l : 1 si el centro de compostaje l está abierto en el lugar, 0 en caso contrario $X_{r^y}^y_t$: Flujo de producto desde la ubicación re (i, j, k, l, o) hasta la ubicación re(i, j, k, l, o) en el momento t, (ton) Ih_{jt} : Cantidad de productos almacenados y procesados por centro de distribución j en el momento t, (toneladas)	Cantidad de productos ingresados menos la cantidad desperdiciada sea igual al número de productos enviados desde los productores a los centros de distribución y clientes. Los productos se envíen a una ubicación potencial solo si se abre un centro de distribución en esa ubicación. Valor ingresado producto de cada productor es menor o igual a la tasa de producción máxima anticipada. Nivel de inventario del centro de distribución en cada período sea	ANEXO 4

Costo de procesamiento y embalaje por unidad de productos del centro de distribución j en

tiempo t

Costo de fabricación de compost por unidad de productos del centro de composición l en

tiempo t

Costo de producción por unidad de productos.

Coefficiente de peso (importancia) para responder a la demanda de fruta

Demanda del producto procesado por el cliente k en el momento t

1

Coefficiente de peso (importancia) para responder a la demanda de compost

λ_{it} : Cantidad de producción ingresada a la cadena de suministro por el productor i en el momento t

equivalente al nivel de inventario del período anterior más el número de productos recibidos de

productores menos la cantidad de productos enviados a los clientes y centros de compostaje.

Cantidad de vermicompost enviado a los mercados de compost en cada período es menor o igual a la demanda.

de cada mercado de compost
Producto devuelto enviado a centros de compostaje de cada productor es menor o igual a la tasa de desperdicio de producción.

expresan el hecho de que los productos devueltos pueden enviarse desde

productores, centros de distribución y mercados a un centro de compostaje sólo si un centro de compostaje

Demanda de producto reprocesado (compost) por mercado de compost o en el momento t

Emisiones fijas para establecer (apertura) centro de distribución j

Emisiones fijas para establecer (abrir) un centro de compostaje l

Retención de emisiones en el centro de distribución j

Emisiones de procesamiento y empaque por unidad de productos provenientes de la distribución centro j

Emisión por reprocesamiento de producto en centro de composición

Emisiones de producción por unidad de productos de los productores

Se abre un centro en una ubicación potencial para dicha instalación.

los productos devueltos recibidos de los productores, centros de distribución y clientes multiplicados por la tasa de conversión es igual al producto reprocesado total (vermicompost) enviado a los mercados de compost cantidad de el vermicompost enviado a los mercados de compost en cada período es menor o igual a la capacidad de fabricación de cada mercado de compost

Cantidad de frutas enviadas desde el área del cliente a los centros de compostaje en cada período es menor que el suma de entradas al área de clientes.

Emisiones del transporte
por unidad de distancia por
unidad de producto

Porcentaje de desperdicio
del producto cosechado
por los productores en el
momento

Un gran número positivo
Capacidad de producción
del productor i en el
momento t

Capacidad de retención del
centro de distribución

Porcentaje de desperdicio
del producto almacenado
por los clientes en el
momento t

Porcentaje de desperdicio
del producto almacenado
por centros de distribución
en el momento t

Capacidad de fabricación
de compost del centro de
compostaje l

	Tasa de conversión de la fruta a compost		
	Costo de destrucción por unidad de frutas desperdiciadas		
M-05	Capacidad de tuberías	Biodiesel producido a partir de Jatropha en el sitio de producción p en el período t	Capacidad de las fuentes de suministro de materias primas.
	Capacidad de los sitios de producción	Biodiesel producido a partir de microalgas en el sitio de producción p en el período t	Biomasa residual, que incluye la cantidad d excremento de vaca, excremento de pollo y paja de trigo disponibles como recurso de suministro en cada período
	Ubicaciones de los sitios de producción	Área de campo asignada para el cultivo de Jatropha en la ubicación	Capacidad de las microalgas recursos de biomasa que incluye la cantidad de dióxido de carbono producido por las centrales eléctricas, agua salina, agua dulce y aguas residuales en cada período.
	Materias primas relacionadas con la producción energética a partir de residuos agrícolas y ganaderos.	Agua dulce necesaria para el cultivo de microalgas en el sitio de producción p en el período t	Área de tierra disponible para el cultivo de Jatropha.
	Materias primas relacionadas con la producción energética a partir de microalgas.	Jatropha almacenada en el almacén w en el período t	
	Ubicación de las fuentes de suministro de materia prima	Jatropha transportada desde la fuente de	
	Períodos de tiempo		
	Capacidad de almacenes		
	Parámetros económicos		ANEXO 5

Costo de capital de la construcción del sitio de producción (relacionado con Jatropha) con capacidad c en la ubicación p

Costo de capital de la construcción del sitio de producción (relacionado con microalgas) con capacidad c en la ubicación p

Costo de capital del sitio de producción de construcción (relacionado con la biomasa residual) con capacidad c en la ubicación

Costo de capital de construcción del almacén de Jatropha con capacidad b en la ubicación

Costo de capital de la construcción de un oleoducto con capacidad d

suministro r al almacén w en el período t

Jatropha transportada desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Nitrógeno comprado en el mercado para el sitio de producción p en el período t

Fósforo comprado en el mercado para el sitio de producción p en el período t

Electricidad producida en el sitio de producción p en el período t

Materia prima i almacenada en el almacén w en el período de tiempo t

Materia prima i transportada desde la fuente de suministro r al almacén w en el período t

Materia prima i transportada desde el

Capacidad de los almacenes para almacenar biomasa residual.

Estiércol animal no debe almacenarse en los almacenes más de un período debido a la posibilidad de putrescencia.

Tenencia de inventarios que muestran la ecuación de los flujos de entrada y salida de los almacenes.

capacidad de las tuberías para el transporte de materias primas.

Capacidad de carga del digestor en la planta de biogás y la capacidad de biogás, plantas de generación de electricidad a partir de biogás.

capacidad del sitio de producción de biodiesel de Jatropha.

relación de combinación de materias primas en el digestor anaeróbico.

para transportar materia prima j desde la fuente de suministro r hasta el sitio de producción

Costo de capital del cultivo de *Jatropha* por unidad de tierra en la ubicación r

Costo de capital de la construcción de un almacén para materia prima i con capacidad b en la ubicación w

Coefficiente del costo total de inversión para calcular el costo fijo anual

Tasa de descuento

Costo unitario del cultivo de *Jatropha* en la ubicación r en el período

Costo unitario de generar electricidad en el sitio de producción p en el período t

almacén w al sitio de producción p en el período t

Materia prima j transportada desde la fuente de suministro r al sitio de producción p en el período t

Agua necesaria para ajustar la concentración de la solución en el digestor en el sitio de producción p en el período t

Agua requerida para riego Campo de *Jatropha* en la ubicación r en el período t

Electricidad producida en el sitio de producción p en el período t

Materia prima i almacenada en el almacén w en el período de tiempo t

Materia prima i transportada desde la

relación de combinación de materias primas en el digestor anaeróbico.

concentración adecuada de mezcla de materiales en el digestor que debe estar en un rango específico y también indicar la cantidad de agua.

Cantidad de electricidad producida por las plantas de biogás.

Utilización de un solo tipo de agua dulce o agua salina en piscinas de microalgas.

Suministro de agua necesaria para la producción de microalgas, que puede provenir de agua dulce, agua salada y aguas residuales.

suministro de nitrógeno y fósforo necesarios para la producción de microalgas, respectivamente, que pueden ser a partir de aguas residuales o se puede comprar en los

Costo unitario de mantener Jatropha en el almacén w en el período t

Costo unitario de mantener la materia prima i en el almacén w en el período t

Costo unitario de producir biodiesel a partir de Jatropha en el sitio de producción p en el período t

Costo unitario de producción de biodiesel a partir de microalgas en el sitio de producción p en el período t

Costo unitario de comprar nitrógeno en el mercado para el sitio de producción p en el período t

Costo unitario de compra de fósforo en el mercado para el sitio de producción p en el período t

fuerza de suministro r al almacén w en el período t

Materia prima i transportada desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Biodiesel producido a partir de microalgas en el sitio de producción p en el período t

Nitrógeno comprado en el mercado para el sitio de producción p en el período t

Fósforo comprado en el mercado para el sitio de producción p en el período t

Materia prima j transportada desde la fuente de suministro r al sitio de producción p en el período t

mercados locales en forma de fertilizantes.

suministro de carbono requerido, dióxido de carbono de las centrales eléctricas.

cantidad de biodiesel producido a partir de microalgas.

Cantidad de Jatropha cosechada en cada período.

cantidad de agua necesaria para regar las tierras de Jatropha.

Cantidad de biodiesel producido a partir de Jatropha.

Costo unitario de compra de materia prima i de la fuente de suministro r en el período t

Costo unitario de transporte de *Jatropha* desde la fuente de suministro r hasta el almacén w en el período t

Costo unitario de transporte de *Jatropha* desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Costo unitario de transporte de materia prima i desde la fuente de suministro r hasta el almacén w en el período t

Costo unitario de transporte de materia prima i desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Biodiesel producido a partir de *Jatropha* en el sitio de producción p en el período t

Área de campo asignada para el cultivo de *Jatropha* en la ubicación r

Jatropha almacenada en el almacén w en el período t

Jatropha transportada desde la fuente de suministro r al almacén w en el período t

Jatropha transportada desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Agua necesaria para ajustar la concentración de la solución en el digestor en el sitio de producción p en el período t

Agua requerida para riego Campo de *Jatropha* en la ubicación r en el período t

Costo unitario de transporte de materia prima j desde la fuente de suministro r hasta el sitio de producción p en el período t

Parámetros técnicos

Área de terreno disponible para el cultivo de *Jatropha* en la ubicación

Área de piscinas de microalgas con nivel de capacidad

Capacidad del digestor en el sitio de producción p con nivel de capacidad c

Capjrp

Capacidad de la tubería con nivel de capacidad d para transportar materia prima j desde la fuente de suministro r hasta el sitio de producción p

Capacidad del sitio de producción p con nivel de

Agua dulce necesaria para el cultivo de microalgas en el sitio de producción p en el período t

capacidad c para
generación de electricidad
Capacidad del sitio de
producción p con nivel de
capacidad c para Jatropha
Capacidad de la fuente de
suministro r para la materia
prima i en el período
Capacidad de la fuente de
suministro r para la materia
prima j en el período de
tiempo t
Capacidad del almacén de
materia prima i en la
ubicación w con nivel de
capacidad b
Capacidad del almacén de
Jatropha en la ubicación w
con nivel de capacidad b
Tasa de conversión de
biomasa de Jatropha a
biodiesel
Factor de conversión del
biodiesel de Jatropha en
energía

Tasa de conversión de biomasa de microalgas a biodiesel

Factor de conversión del biodiesel de microalgas en energía

Tasa de conversión de biomasa residual en electricidad

Concentración máxima de solución en el digestor

Concentración mínima de solución en el digestor

Nitrógeno Porcentaje de aguas residuales

Fósforo Porcentaje de aguas residuales

Relación entre excrementos de aves y excrementos de vaca en un digestor anaeróbico

Proporción de paja a excreta de vaca en un digestor anaeróbico

Requerido Dióxido de carbono por unidad de microalga

Nitrógeno requerido por unidad de microalga

Fósforo necesario por unidad de microalga

Agua requerida por unidad de microalg

Contenido sólido total de la materia prima

La cantidad de algas producidas por unidad de área de piscina en el sitio de producción p en el período

Tasa de rendimiento del campo de Jatropha en la ubicación r en el período t

Parámetros relacionados con el nexa agua-energía

Cantidad de lluvia en la ubicación r en el período de tiempo t

Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida

Energía necesaria para el riego de tierras de jatrofa por unidad de agua

Energía necesaria para transportar agua a las piscinas de microalgas y hacerla circular por unidad de superficie de la piscina

Precipitación mínima requerida para el cultivo de Jatropha en la ubicación r en el período t

Parámetros relacionados con las emisiones de CO2

Emisiones de CO2 por unidad de electricidad producida en plantas de biogás

Emisiones de CO2 del cem por unidad de biodiesel

producido a partir de
microalgas

Emisiones de CO₂ por
unidad de campos de
Jatropha

Emisiones de CO₂ por
unidad de biomasa
transportada desde la
fuente de suministro r al
almacén w con camión

Emisiones de CO₂ por
unidad de biomasa
transportada desde el
almacén w al sitio de
producción p con camión

Biodiesel producido a
partir de Jatropha en el
sitio de producción p en el
período t

Biodiesel producido a
partir de microalgas en el
sitio de producción p en el
período

Área de campo asignada para el cultivo de *Jatropha* en la ubicación r

Agua dulce necesaria para el cultivo de microalgas en el sitio de producción p en el período t

Jatropha almacenada en el almacén w en el período t

Jatropha transportada desde la fuente de suministro r al almacén w en el período t

Jatropha transportada desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Nitrógeno comprado en el mercado para el sitio de producción p en el período

Fósforo comprado en el mercado para el sitio de producción p en el período t

Electricidad producida en el sitio de producción p en el período t

Materia prima i almacenada en el almacén w en el período de tiempo t

Materia prima i transportada desde la fuente de suministro r al almacén w en el período t

Materia prima i transportada desde el almacén w al sitio de producción p en el período t

Materia prima j transportada desde la fuente de suministro r al sitio de producción p en el período t

Agua necesaria para ajustar la concentración de la solución en el digestor en el sitio de producción p en el período t

Agua requerida para riego
Campo de Jatropha en la
ubicación r en el período t

**Parámetros relacionados
con las emisiones de CO2**

Emisiones de CO2 por
unidad de electricidad
producida en plantas de
biogás

Emisiones de CO2 del cem
por unidad de biodiesel
producido a partir de
microalgas

Emisiones de CO2 por
unidad de campos de
Jatroph

Emisiones de CO2 por
unidad de biomasa
transportada desde la
fuente de suministro r al
almacén w con camión

Emisiones de CO2 por
unidad de biomasa
transportada desde el

M-06	<p>almacén w al sitio de producción p con camión</p> <p>conjunto de periodos de 15 min para un año</p> <p>conjunto de tarifas disponibles</p> <p>conjunto de aerogeneradores; conjunto de baterías que se pueden utilizar</p> <p>vida útil de la batería en años</p> <p>periodo i adoptando la producción de energía (kWh) en el período i utilizando la turbina</p> <p>demanda de energía (kWh)</p> <p>valor aumentado que representa la suma de los valores de demanda de energía</p> <p>capacidad de la batería</p> <p>coste de la batería i en euros</p>	<p>- Maximizar el rendimiento de la inversión.</p> <p>- Minimizar el coste total de la energía comprada a la red</p> <p>energía (kWh) que se compra a la red en el periodo i adoptando la tarifa j,</p> <p>número de baterías usadas del tipo i,</p> <p>potencia (kW) almacenada en la batería durante el período i, $i \in P$</p> <p>suministro de energía de la batería (kW) durante el período i, $i \in P$;</p> <p>stock de energía (kWh) en la batería al inicio del período i, $i \in P$;</p> <p>variable binaria que asume el valor 1 si se utiliza turbina tipo j y asume el valor 0 en caso contrario, $j \in WT$;</p> <p>variable binaria que asume el valor 1 si se adopta la</p>	<p>Coste total de inversión en aerogeneradores y baterías junto con el valor de la energía comprada de la red para el período adoptado.</p> <p>tarifa para la compra de energía para el edificio.</p> <p>elección de más de un tipo de turbina o batería.</p> <p>condiciones de carga, descarga y almacenamiento.</p> <p>condiciones de carga, descarga y almacenamiento, las baterías, para que el funcionamiento del sistema de almacenamiento de energía funcione correctamente.</p> <p>Periodos que se cubra la demanda de energía y se almacene el excedente de energía.</p>
------	---	---	---

ANEXO 6

coste del aerogenerador
 tasa de inflación del precio
 de la energía comprada a la
 red $T = \{1, 2\}$, el conjunto
 de tarifas disponibles
 conjunto de aerogeneradores
 el conjunto de baterías que
 se pueden utilizar;
 vida útil de la batería en
 años
 precio (EUR/kWh) en el
 periodo i adoptando la
 tarifa j
 producción de energía
 (kWh) en el período i
 utilizando la turbina j ,
 demanda de energía (kWh)
 en el periodo
 valor aumentado que
 representa la suma de los
 valores de demanda de
 energía;
 capacidad de la batería

tarifa j , y asume la valor 0
 en caso contrario, $j \in T$;
 variable binaria que asume
 el valor 1 si se utiliza el
 sistema de
 almacenamiento j y asume
 el valor 0 en caso
 contrario, $j \in B$;
 variable binaria que indica
 si se utiliza la energía
 almacenada en las baterías
 en el periodo i , $i \in P$;
 - variable binaria que
 indica si hay
 almacenamiento de
 energía en las baterías en el
 periodo i , $i \in P$

Impedimentos que se
 produzcan simultáneamente
 una carga y una descarga.
 Impedimentos que se utilice
 más de una tarifa.
 Garantizar que no se superen
 los ciclos de carga y descarga
 de las baterías que limitan la
 vida útil de la batería

coste de la batería i en euros.

coste del aerogenerador

tasa de inflación del precio de la energía comprada a la red

M-07	Porcentaje máximo de devoluciones al final de la vida útil (Devolución en el lugar de reciclaje). Porcentaje máximo de devoluciones totales (Devolución en el lugar de recogida). Porcentaje máximo de devolución comercial (Devolución en lugar de reparación). Capacidad máxima del fabricante (en términos de unidades). Precio de venta de los distintos tipos de productos.	- Minimizar los efectos medioambientales. - Maximizar el beneficio neto del producto.	Cantidad de diferentes tipos de producto a fabricar. Cantidad de productos diferentes a reparar. Cantidad de diferentes tipos de productos en el lugar de recogida. Cantidad de diferentes tipos de productos devueltos para su desmontaje. Cantidad de conjuntos diferentes de artículos comprados a conjuntos diferentes de proveedores. Cantidad de conjuntos diferentes de piezas que se	Cantidad de piezas fabricadas es igual a la suma de la cantidad de piezas recicladas y de piezas compradas a los proveedores. total de piezas desmontadas es igual a la suma de las piezas desechadas y las piezas recicladas. unidades de piezas que se obtienen en el lugar de desmontaje total de unidades de un tipo de pieza que deben reciclarse en las plantas de reciclado sean inferiores o iguales al porcentaje máximo de devoluciones al final de su vida útil multiplicado por las
------	--	--	---	--

ANEXO 7

Utilización de recursos para fabricar una unidad de diferentes tipos de productos.

Coste de mantenimiento de existencias para recoger una unidad de diferentes tipos de productos.

Coste medioambiental unitario para desechar diferentes tipos de piezas.

Coste unitario de fabricación de diferentes tipos de productos.

Uso de recursos para reparar una unidad de diferentes tipos de productos.

Capacidad máxima del centro de reparación para diferentes tipos de productos.

Demanda de diferentes tipos de productos.

obtienen en el lugar de desmontaje.

Cantidad de conjuntos diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje diferentes.

Cantidad de conjuntos de piezas diferentes que se eliminarán en el lugar de eliminación.

unidades de la pieza obtenidas en el lugar de desmontaje.

total de recursos utilizables es inferior o igual a la capacidad del fabricante.

cantidades de producto a reparar y las unidades de producto devuelto que hay que desmontar es igual al número de productos en el lugar de recogida.

uso total de recursos para desmontar las piezas no es mayor que la capacidad del lugar de desmontaje.

cantidades de un producto a producir y del producto a reparar es igual a la demanda del producto.

cantidad de un producto en el lugar de recogida es menor o igual al porcentaje máximo de devoluciones totales multiplicado por la suma de

Coste unitario de recogida de diferentes tipos de productos.

Coste de reparación de una unidad de diferentes tipos de productos.

Capacidad máxima del centro de desmontaje para desmontar diferentes tipos de piezas.

Utilización de recursos para desmontar una unidad de piezas diferentes.

Coste unitario de desmontaje de diferentes piezas.

Coste unitario de desmontaje de piezas diferentes.

Coste unitario de reciclado de distintos tipos de piezas en distintos centros de reciclado.

Uso de recursos para reciclar una unidad de

cantidades del producto a producir y reparar.

Relación entre el número de productos devueltos que hay que desmontar y la cantidad de producto en el centro de recogida.

utilización total de recursos internos para producir las piezas por el no supere la capacidad máxima del proveedor externo.

unidades de producto a reparar son inferiores o iguales a un porcentaje máximo de devoluciones comerciales por unidades de producto en el centro de recogida.

Uso total de recursos para reciclar todas las piezas no es mayor que la capacidad máxima de los centros de reciclaje.

Recursos para reparar los productos no supera la

diferentes piezas en diferentes lugares de reciclaje.

Capacidad máxima de los centros de reciclaje para reciclar distintas piezas.

Cantidad de piezas diferentes necesarias para producir una unidad de varios tipos de productos.

Coste de compra de varias piezas diferentes a proveedores externos.

Utilización de recursos de distintos proveedores para producir una unidad de varios tipos de productos.

capacidad máxima del centro de reparación.

Relación entre las unidades de piezas que deben eliminarse y el número de piezas obtenidas en el lugar de desmontaje.

Nota. En esta tabla se muestra la categorización de los modelos de optimización según su objetivo ambiental. *Elaborado por: Vaca, (2024)*

En la tabla se da a conocer los modelos matemáticos de optimización pertinentemente desglosados, así mismo se identificó los siguientes criterios como son: parámetros de modelado, función objetivo, variables de decisión, restricción y modelización

Tabla 9*Parámetros*

Objetivos ambientales			
Emisiones de CO ₂	Aguas residuales	Residuos sólidos	Energía
<ul style="list-style-type: none"> • Costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro • Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor • Costo de producción por unidad de productos. • Emisiones por unidad de producto 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo unitario de tratamiento de aguas residuales • Agua limpia y saneamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de residuos sólidos • Separación de residuos sólidos • Tratamiento de residuos sólidos • Compostaje de residuos sólidos • Disposición final de residuos sólidos • Volumen total de escombros en la zona afectada • La cantidad de residuos sólidos • Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje 	<ul style="list-style-type: none"> •Energía equivalente de productos finales •Electricidad producida a partir de residuos •Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido •Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida •Consumo máximo de energía por periodo •Costo unitario de generar electricidad en el sitio

Nota. La tabla muestra los parámetros más destacados. *Elaborado por:* Vaca, (2024)
 Los parámetros mostrados en la tabla son los más destacados dentro de los objetivos ambientales, estos objetivos son recopilados dentro de las emisiones de CO₂, aguas residuales, residuos sólidos y energía.

Tabla 10

Parámetros desglosados

Modelo	Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	Agua limpia y saneamiento	Uso consuntivo del agua en la agricultura	Agua requerida por unidad de microalga	Nitrógeno requerido por unidad de microalga	Cantidad de nitrógeno en las aguas residuales	Cantidad de fósforo en las aguas residuales	costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	Costo de producción por unidad de productos.	Emisiones por unidad de producto	Emisiones de CO2 por unidad de biomasa transportada desde el almacenamiento	Generación de residuos sólidos	Separación de residuos sólidos	tratamiento de residuos sólidos	compostaje de residuos sólidos	Separación de residuos sólidos
M-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99,99%	43,55%	3,68%	35,60%	43,55%
M-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M-03	28%	34,10%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M-04	0	0	0	0	0	0	0	42,67%	97,60%	100%	1%	0	0	0	0	0	0
M-05	28%	34,10%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99,99%	43,55%	3,68%	35,60%	43,55%

Disposición final de residuos sólidos	Volumen total de escombros en la zona afectada	Costo de procesamiento por unidad de residuo	Emissiones de carbono durante el procesamiento de desechos	Energía generada por tonelada de residuos sólidos	La cantidad de residuos sólidos	Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	Energía equivalente de productos finales	Tasa de conversión de petróleo a biodiesel	Electricidad producida a partir de residuos	Consumo energético de los proveedores para	Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	Coste energético por periodo	Consumo máximo de energía por periodo	Consumo de energía para producir cada unidad	Costo unitario de generar electricidad en el sitio
50,78%	7,40%	0	0	0	40,98%	3,68%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	10,70%	0	1,10%	0	42,67%	1,40%	0	100,00%	0	96,30%
0	0	0	0	0	0	0	10,70%	0	1,10%	0	42,67%	1,40%	0	100,00%	0	96,30%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	10,70%	0	1,10%	0	42,67%	1,40%	0	100,00%	0	96,30%
0	0	0	0	0	0	0	10,70%	0	1,10%	0	42,67%	1,40%	0	100,00%	0	96,30%
50,78%	7,40%	0	0	0	40,98%	3,68%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota. En esta tabla se muestra los parámetros seleccionados de cada modelo. *Elaborado por:* Vaca, (2024)

Los parámetros elegidos fueron revisados dentro de la encuesta ENESEM 2020, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC del apartado información económica ambiental en empresas, los mismos que fueron analizados de las 703 empresas para así darles un valor. Por otro lado, los parámetros que no se han identificado en dicha encuesta se eliminan para desarrollar el método CRITIC

Tabla 11

Suma Normalizada

	Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	Agua limpia y saneamiento	costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	Costo de producción por unidad de productos.	Emisiones por unidad de producto	Generación de residuos sólidos	Separación de residuos sólidos	tratamiento de residuos sólidos	compostaje de residuos sólidos	disposición final de residuos sólidos	Volumen total de escombros en la zona afectada	La cantidad de residuos sólidos	Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	Energía equivalente de productos finales	electricidad producida a partir de residuos	Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digester por unidad de electricidad	Consumo máximo de energía por periodo	Costo unitario de generar electricidad en el sitio
Modelos	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
M-01	0	0	0	0	0	0	99,99	43,55	3,68	35,6	50,78	7,4	40,98	3,68	0	0	0	0	0	0
M-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-03	28	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-04	0	0	43	98	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M-05	28	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-07	0	0	0	0	0	0	99,99	43,55	3,68	35,6	50,78	7,4	40,98	3,68	0	0	0	0	0	0
MAX	28	34	43	98	100	1	100	44	4	36	51	7	41	4	11	1	43	1	100	96
MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	56	68,2	42,67	97,6	100	1	199,98	87,1	7,36	71,2	101,56	14,8	81,96	7,36	42,8	4,4	170,68	5,6	400	385,2

Nota. Los parámetros con su respectivo valor, eliminados los que no contaban en la encuesta, a partir de esa matriz se elaboró la suma ponderada *Elaborado por:* Vaca, (2024)

Tabla 12

Normalización por el rango

	Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	Agua limpia y saneamiento	costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	Emisión de Carbono por contenedor KM por cada	Costo de producción por Emisiones por unidad de	Generación de residuos sólidos	Separación de residuos	tratamiento de residuos sólidos	compostaje de residuos	disposición final de residuos sólidos	Volumen total de escombros en la zona afectada	La cantidad de residuos sólidos	Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	Energía equivalente de productos finales	electricidad producida a partir de residuos	Consumo de combustible del vehículo en m por cada	Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por	Consumo máximo de energía por periodo	Costo unitario de generar electricidad en el sitio	
Modelos	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
M-01	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
M-02	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
M-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
M-04	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
M-05	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M-06	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	1	1	1	1	1	
M-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
Desviación estándar	0,4	0,4	0,34	0,349	0,	0,	0,45	0,4	0,45	0,4	0,45	0,45	0,45	0,451	0,49	0,49	0,494	0,49487	0,494	0,494
	52	52	99	93	35	35	18	52	18	52	18	18	18	75	49	49	87	166	87	87

Nota. En esta tabla se muestra la normalización por rango obteniendo la desviación estándar. *Elaborado por:* Vaca, (2024)

Tabla 13

Coefficiente de correlación

	Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	Agua limpia y saneamiento	costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	Costo de producción por unidad de productos.	Emisiones por unidad de producto	Generación de residuos sólidos	Separación de residuos sólidos	tratamiento de residuos sólidos	compostaje de residuos sólidos	disposición final de residuos sólidos	Volumen total de escombros en la zona afectada	La cantidad de residuos sólidos	Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	Energía equivalente de productos finales	electricidad producida a partir de residuos	Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	Consumo máximo de energía por período	Costo unitario de generar electricidad en el sitio
Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	1																			
Agua limpia y saneamiento		1																		
costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro			1																	
Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor				1																
Costo de producción por unidad de productos.					1															
Emisiones por unidad de producto						1														
Generación de residuos sólidos							1													
Separación de residuos sólidos								1												
tratamiento de residuos sólidos									1											
compostaje de residuos sólidos										1										
disposición final de residuos sólidos											1									
Volumen total de escombros en la zona afectada												1								
La cantidad de residuos sólidos													1							
Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje														1						
Energía equivalente de productos finales	0,54772256	0,54772226	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	1					
electricidad producida a partir de residuos	0,54772256	0,54772226	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297		1				
Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	0,54772256	0,54772226	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297			1			
Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	0,54772256	0,54772226	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297				1		
Consumo máximo de energía por período	0,54772256	0,54772226	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297					1	
Costo unitario de generar electricidad en el sitio	0,54772256	0,54772226	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,471405	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297	-0,730297						1

Nota. En esta tabla se verifico el coeficiente de correlación. La tabla se visualiza de mejor forma en el ANEXO 8 *Elaborado por: Vaca, (2024)*

Tabla 14**Método critic**

Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	8,559138268	11,07%
Agua limpia y saneamiento	8,559138268	11,07%
Costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	6,611529127	8,55%
Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	6,611529127	8,55%
Costo de producción por unidad de productos.	6,611529127	8,55%
Emisiones por unidad de producto	6,611529127	8,55%
Generación de residuos sólidos	4,690010346	6,07%
Separación de residuos sólidos	4,690010346	6,07%
Tratamiento de residuos sólidos	4,690010346	6,07%
Compostaje de residuos sólidos	4,690010346	6,07%
Disposición final de residuos sólidos	4,690010346	6,07%
Volumen total de escombros en la zona afectada	5,593518249	7,24%
La cantidad de residuos sólidos	4,690010346	6,07%
Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	0	0,00%
Energía equivalente de productos finales	0	0,00%
Electricidad producida a partir de residuos	0	0,00%
Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	0	0,00%
Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	0	0,00%
Consumo máximo de energía por periodo	0	0,00%
Costo unitario de generar electricidad en el sitio	0	0,00%
TOTAL	77,29797337	

Nota. La tabla del método CRITIC muestra en que parámetro tiene mayor peso.

Elaborado por: Vaca, (2024)

El método CRITIC fue utilizado para dar pesos a los parámetros de los cuales arroja la siguiente información según los parámetros de mayor peso: Costo unitario de tratamiento de aguas residuales, y, agua limpia y saneamiento tienen un peso de 11,07% siendo el de mayor valor, seguido por los parámetros de costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro, emisión de carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor, costo de producción por unidad de productos y emisiones por unidad de producto con un peso de 8,55% y finalmente volumen total de escombros en la zona afectada con un peso de 7,24%. Dando esos parámetros como los elegidos para continuar con la selección del modelo matemático de optimización.

4.1.3 Análisis multicriterio

Discriminar el modelo matemático que optimice los objetivos ambientales en la industria manufacturera.

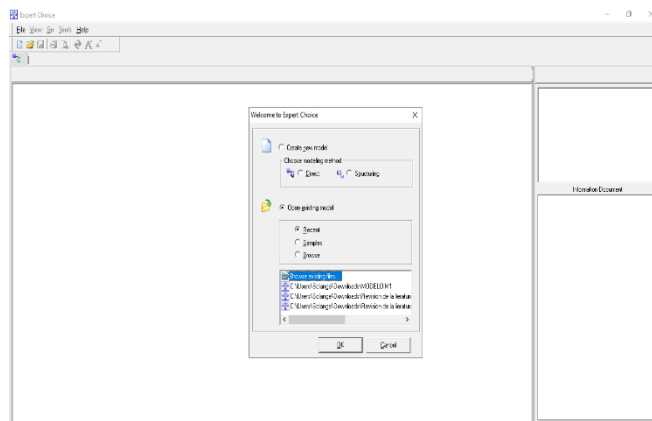
En este objetivo se selecciona el modelo matemático de optimización más apto acorde a los objetivos ambientales de la industria manufacturera del Ecuador

A continuación, se detalla como los pasos realizados para la selección del mejor modelo matemático de optimización.

Figura 7

Expert Choice

Abrir el programa Expert Choice.



Nota. Los modelos y parámetros son asignados. Fuente: Expert Choice.

1. Abrir el programa Expert Choice
2. Escoger la opción “Create new model” y presionar en “OK”

Figura 8 Creación de alternativas y parámetros

Creación de alternativas y parámetros



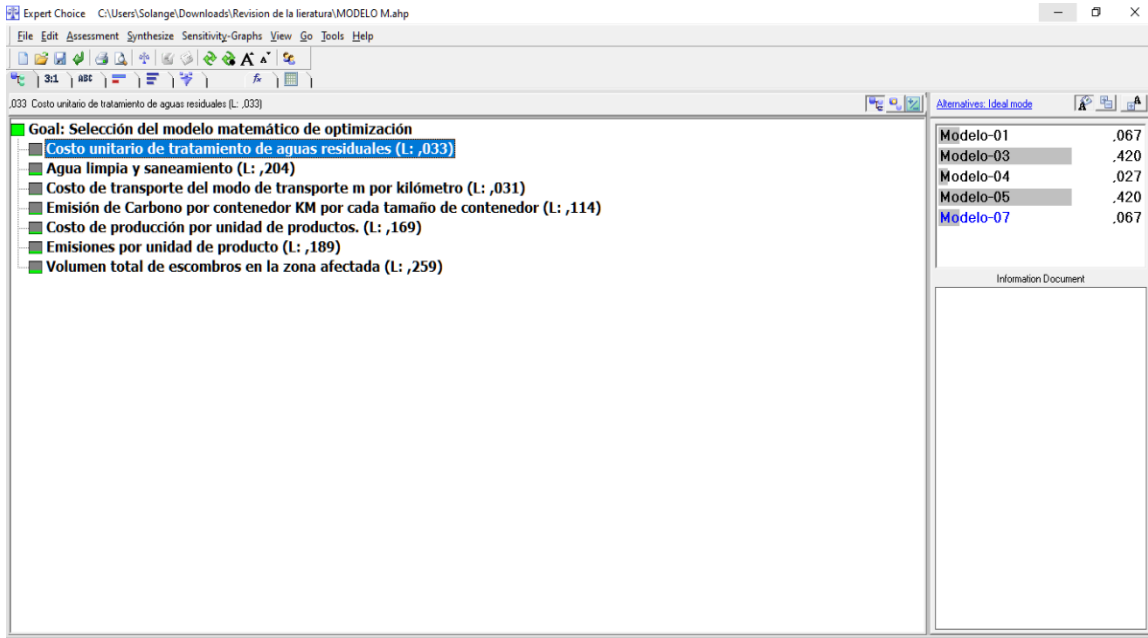
Nota. Los modelos y parámetros son asignados. Fuente: Expert Choice.

3. Colocar el nombre del archivo y guardarlo en alguna carpeta seleccionada.
4. Desplegar la opción “Goal Description”, se procede a escribir la meta a lograr, en este caso “Seleccionar al mejor modelo matemático de optimización” y hacer click en OK.

5. Se procede a presionar en “Affinity Diagramming pane”
A partir del método CRITIC se da un valor a cada parámetro.

Figura 9 Parámetros y modelos

Parámetros y modelos



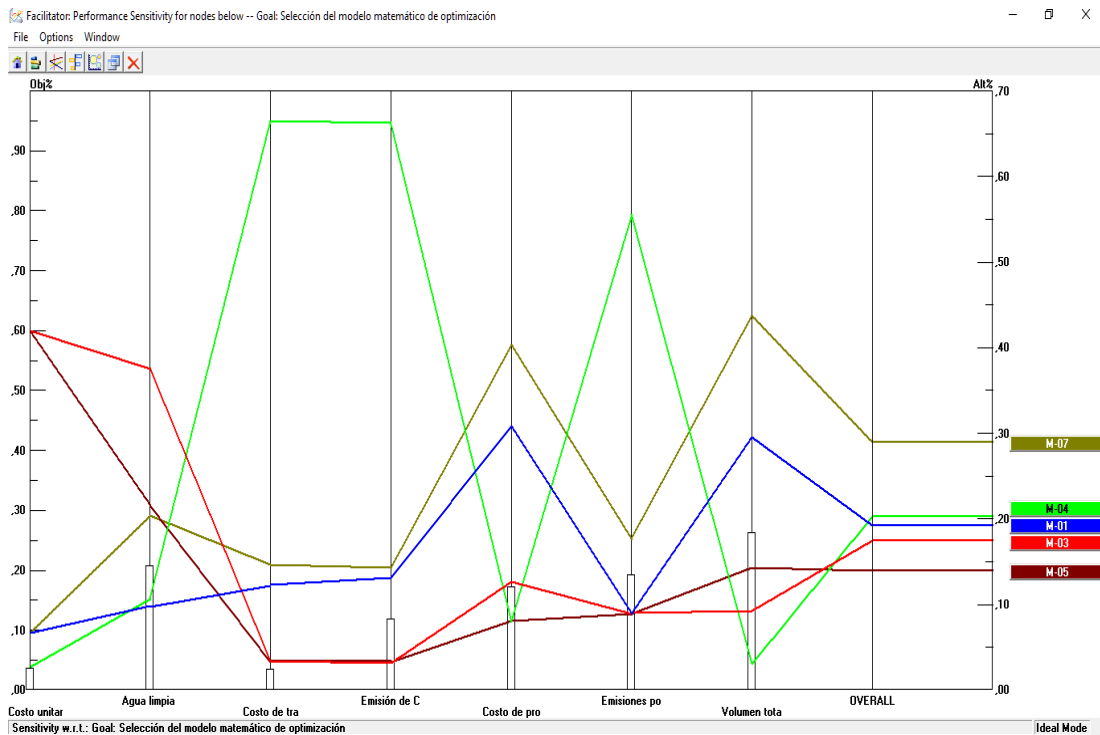
Nota. Los modelos y parámetros son asignados. **Fuente:** Expert Choice. Elaborado por: Vaca, (2024).

En la siguiente figura se muestra los parámetros seleccionados a través del método CRITIC y estos son: costo unitario de tratamiento de aguas residuales, agua limpia y saneamiento, costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro, emisión de carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor, costo de producción por unidad de productos, emisiones por unidad de producto y volumen total de escombros en la zona afectada.

Por otro lado, las alternativas proporcionadas son los modelos los mismos que se interpretan de la siguiente forma: “Modelo-01” se entiende como residuos sólidos, “Modelo-03” se entiende como aguas residuales, “Modelo-04” se entiende como emisiones de CO₂, “Modelo-05” se entiende como aguas residuales y “Modelo-07” se entiende como residuos sólidos.

Figura 10

Sensibilidad de rendimiento para los parámetros



Nota. Facilitador: Sensibilidad de rendimiento para los nodos siguientes - Objetivo: Selección del modelo matemático de optimización. **Fuente:** Expert Choice. Elaborado por: Vaca, (2024).

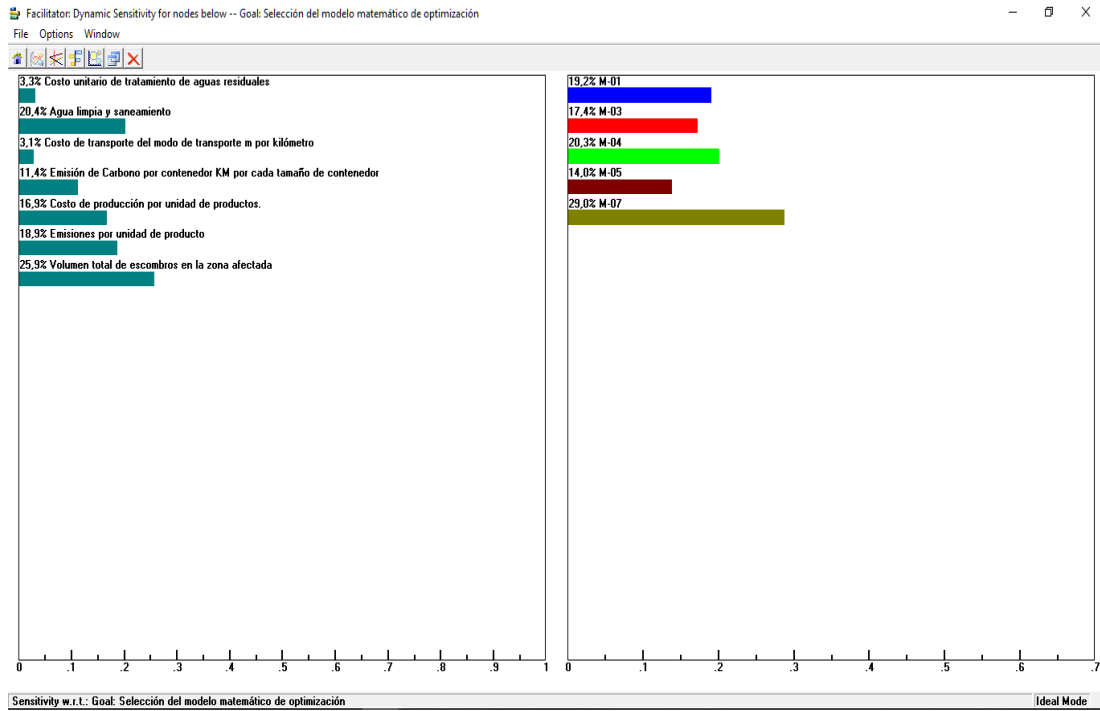
En grafico presenta la sensibilidad de rendimiento para los modelos que tienen como objetivo la selección del modelo matemático de optimización.

Analizando la gráfica de tendencia compuesta por la misma herramienta Expert Choice, muestra que en el Modelo-01 dónde tiene mayor crecimiento es en el parámetro costo de producción por unidad de productos con el casi y volumen total de escombros en la zona afectada; 0,40% para ambos parámetros. Para el Modelo-03 su parámetro con mayor peso es costo unitario de tratamiento de aguas residuales. Del mismo modo para el Modelo-04 su parámetro líder es costo unitario de tratamiento de aguas residuales, emisión de carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor y costo de producción por unidad de productos. Para el Modelo-05 el parámetro con mayor densidad y a la vez con menos valor es volumen total de escombros en la zona afectada con un valor de 0,25%.

Final el Modelo-07 presenta un crecimiento en costo de producción por unidad de productos y volumen total de escombros en la zona afectada cerca de 0,60%.

Figura 11

Sensibilidad Dinámica para los nodos inferiores

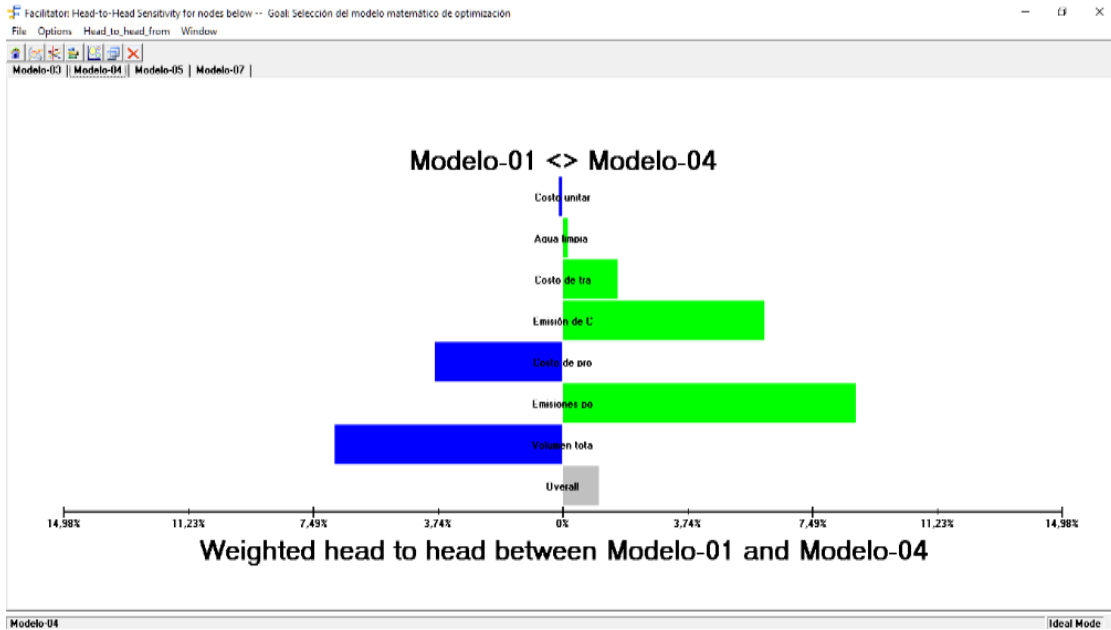


Nota. Facilitador: Sensibilidad Dinámica para los nodos inferiores– Objetivo: Selección del modelo matemático de optimización. **Fuente:** Expert Choice. Elaborado por: Vaca, (2024).

La tabla representa la sensibilidad dinámica de los parámetros con respecto a la selección del modelo matemático de optimización. Mostrando los siguientes datos dados por la herramienta Expert Choice, costo unitario de tratamiento de aguas residuales 3,3%, agua limpia y saneamiento 24,4%, costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro 3,1%, emisión de carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor 11,4%, costo de producción por unidad de productos 19,9%, emisiones por unidad de producto 18,9% y volumen total de escombros en la zona afectada 25,9%.

Figura 12

Sensibilidad cara a cara para los nodos inferiores



Nota. Facilitador: Sensibilidad cara a cara para los nodos inferiores– Objetivo: Selección del modelo matemático de optimización. **Fuente:** Expert Choice. Elaborado por: Vaca, (2024).

La tabla muestra una comparación entre el Model-01 y elModelo-04. Los cuales son las opciones más factibles para seleccionar el modelo matemático de optimización, dónde en la comparación lidera el parámetro emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor; en el Modelo-04. Mientras que en el Modelo-01 lidera el volumen total de escombros en la zona afectada

4.2 Fundamentación de las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación propuestas que se va a verificar son:

¿Cuáles son los objetivos ambientales establecidos para la industria manufacturera en Ecuador?

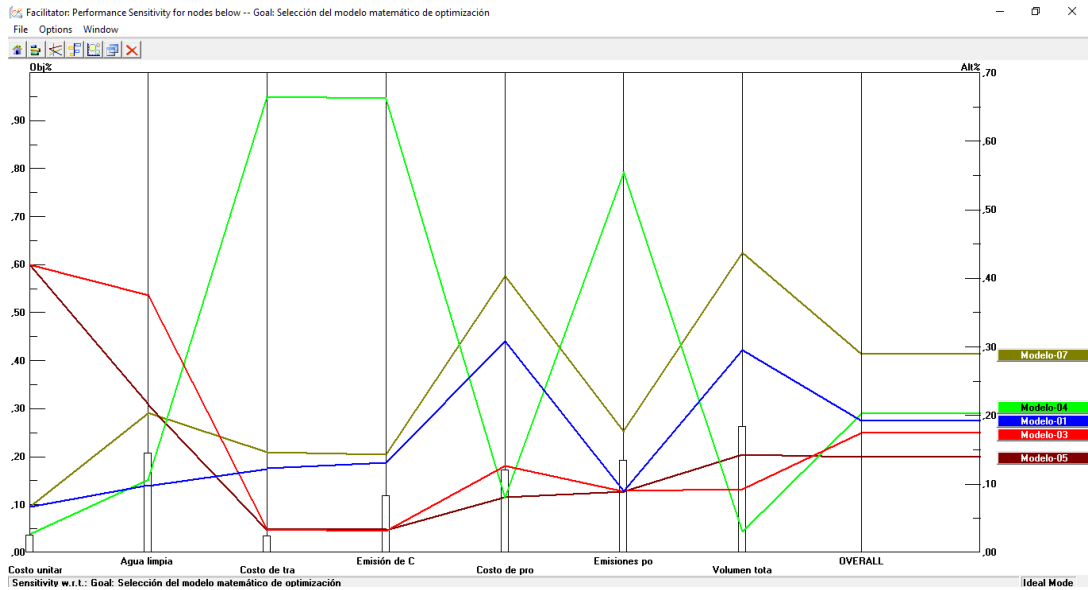
Los objetivos ambientales establecidos para la industria manufacturera son: reducción de las emisiones o concentraciones de las contaminantes del aire, prevención de la contaminación de aguas superficiales mediante la liberación de las aguas residuales, prevención de la generación de los residuos o desechos, reducción con referente a los efectos del medio ambiente, prevención de infiltración de contaminantes del suelo y de las aguas subterráneas, reducción y control de los ruidos de las vibraciones industriales,

reducción de las radiaciones con referente a la manipulación y tratamiento de los desechos radioactivos, minimización en la extracción de recursos biológicos distintos de los recursos madereros y acuáticos, minimización en la extracción recursos hídricos mediante la modificación de sus procesos, capacitación, administración, educación para proveer de la información del ahorro de recursos naturales, realización de trabajos de investigación y desarrollo en con referente a la esfera de gestión y ahorro de recursos naturales, protección y rehabilitación de las especies de la flora y fauna, hábitats, ecosistemas, realización de trabajos de investigación y el desarrollo de conocimientos con referente a la protección ambiental, administración y gestión del medio ambiente, capacitación con referente al material ambiental como los procesos de certificación, minimización con referente a la utilización de los recursos minerales energéticos por medio de procesos de reutilización recuperación ahorro de fuentes de los minerales de energía, minimización del uso de los recursos de madereros y la modificación de los procesos forestales y minimización en el uso de peces silvestres y otros recursos acuáticos

¿Qué modelos matemáticos de programación lineal existen, que incluyan variables de sostenibilidad ambiental?

Los modelos de programación lineal son una técnica matemática utilizada en promover la optimización de problemas donde su principal objetivo es maximizar o minimizar una función lineal dada a ciertas restricciones. Por otro lado, al momento de incorporar variables de sostenibilidad ambiental, buscando encontrar soluciones que sean eficientes y, al mismo tiempo, respetando al medio ambiente. Del mismo modo, un análisis de 104 artículos científicos, se logró discriminar a aquellos artículos que cumplen con lo propuesto en los objetivos; esto se logró gracias a las palabras claves como: “modelos matemáticos”, “sostenibilidad”, “programación lineal”, “optimización” e “industria manufacturera” y de esta forma se discrimino los artículos seleccionados. Teniendo en cuenta los siete modelos matemáticos de optimización los cuales coinciden en ser “modelos de programación lineal multiobjetivo” y “modelo de programación lineal entera mixta”.

¿Cuál es el modelo matemático de optimización que más se ajusta a los objetivos ambientales en la industria manufacture ecuatoriana?



El modelo matemático de optimización seleccionado a través de los objetivos propuestos es el “Modelo-04”, el cual, es un modelo de programación lineal entera mixta, además cumple con los siguientes criterios

Este modelo matemático propuesto tiene tres objetivos:

- Minimizar el coste total (Z coste)
- Maximizar la capacidad de respuesta a la demanda del cliente (Z capacidad de respuesta)
- Minimizar las emisiones totales de CO2 en toda la SC (Z emisión)

Parámetros

- W_j : 1 si el centro de distribución j está abierto en la ubicación, 0 en caso contrario
- Y_l : 1 si el centro de compostaje l está abierto en el lugar, 0 en caso contrario
- X_{rryt} : Flujo de producto desde la ubicación re (i, j, k, l, o) hasta la ubicación re (i, j, k, l, o) en el momento t , (ton)
- I_{hjt} : Cantidad de productos almacenados y procesados por centro de distribución j en el momento t , (toneladas)
- λ_{it} : Cantidad de producción ingresada a la cadena de suministro por el productor i en el momento

Minimizar el coste total (Z coste)

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z^{\text{cost}} &= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \\
 Z_1 &= \sum_{j=1}^J f_j W_j + \sum_{l=1}^L f_l Y_l \\
 Z_2 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} d_{ij} dc + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} d_{ik} dc + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} d_{jk} dc \\
 &+ \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} X_{ilt} d_{il} dc + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{ilt} d_{jl} dc + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{klt} d_{kl} dc \\
 &+ \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} d_{lo} dc \\
 Z_3 &= \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T I_{h_{jt}} c_{h_{jt}} \\
 Z_4 &= \sum_{L=1}^I \sum_{J=1}^J \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} c_{\rho_{jt}} + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} c_{\gamma_{lt}} + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} \lambda_{it} c_{\rho'} \\
 Z_5 &= \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} (\lambda_{c_{it}} - \lambda_{it}) wc + \left(\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} (\alpha_i \lambda_{it} - X_{ilt}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \beta_t I_{h_{i(t-1)}} - X_{jlt} \right) \\
 &wc + \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\theta_t (X_{ikt} + X_{jkt}) - X_{klt}) \right) wc
 \end{aligned}$$

Maximizar la capacidad de respuesta a la demanda del cliente (Z capacidad de respuesta)

RESPONSIVENES OBJECTIVE

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z^{\text{responsiveness}} &= \rho \times \left[\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} \right] / \left[\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} d_{kt} \right] \\
 &+ (1 - \rho) \times \left[\sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} \right] / \left[\sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T d_{ot} \right]
 \end{aligned}$$

Minimizar las emisiones totales de CO2 en toda la SC (Z emisión)

Carbon emission objective

$$\begin{aligned}
 \text{Min} Z^{\text{emission}} &= Z^{PE} + Z^{PH} + Z^{PR} + Z^{PT} + Z^{PD} \\
 Z^{PE} &= \sum_{j=1}^J fe_j W_j + \sum_{l=1}^L fel Y_l \\
 Z^{PH} &= \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Ih_{ij} eh_j \\
 Z^{PR} &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} ep_j + \sum_{l=1}^L \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{lot} ec_l + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} \lambda_{it} ep'_i \\
 Z^{PT} &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} d_{ij} de + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} d_{ik} de + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} d_{jk} de + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \\
 &\quad \times \sum_{t=1}^{t'} X_{ilt} d_{il} de + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{jlt} d_{jl} de + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{klt} d_{kl} de + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \\
 &\quad \times \sum_{t=1}^T X_{lot} d_{lo} de \\
 Z^{PD} &= \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} (\lambda_{cit} - \lambda_{it}) we + \left(\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} (\alpha_t \lambda_{it} - X_{ilt}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\beta_t Ih_{i(t-1)} - X_{jlt}) \right) \\
 &\quad we + \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\theta_t (X_{ikt} + X_{jkt}) - X_{klt}) \right) we
 \end{aligned}$$

Constraints

$$\lambda_{it} \times (1 - \alpha_t) = \sum_{j=1}^J X_{ijt} + \sum_{k=1}^K X_{ikt} \quad \forall i \in I, t \in t'$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} \leq M \times W_j \quad \forall j \in J$$

$$\lambda_{it} \leq \lambda_{cit} \quad \forall i \in I, t \in t'$$

$$Ih_{j(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ijt} = Ih_{jt} + \sum_{k=1}^K X_{jkt} + \sum_{l=1}^L X_{jlt} \quad \forall j \in J, t \in T$$

$$Ih_{jt} \leq \lambda h_j \quad \forall j \in J, t \in T$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jkt} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} \leq d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T$$

$$\sum_{l=1}^L X_{lot} \leq d'_{ot} \quad \forall o \in O, t \in T$$

$$\sum_{l=1}^L X_{ilt} \leq \alpha_t \times \lambda_{it} \quad \forall i \in I, t \in t'$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} X_{ilt} \leq M \times Y_i \quad \forall l \in L$$

$$\sum_{l=1}^L X_{jlt} \leq \beta_t \times Ih_{j(t-1)} \quad \forall j \in J, t \in T$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{jlt} \leq M \times Y_l \quad \forall l \in L$$

$$\sum_{l=1}^L X_{klt} \leq \theta_t \times d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T$$

$$\sum_{K=1}^K \sum_{t=1}^T X_{klt} \leq M \times Y_l \quad \forall l \in L$$

$$\left[\sum_{i=1}^I X_{ilt} + \sum_{j=1}^J X_{jlt} + \sum_{k=1}^K X_{klt} \right] \times \varphi \sum_{o=1}^O X_{lot} \quad \forall l \in L, t \in T$$

$$\sum_{o=1}^O X_{lot} \leq \lambda r_l \quad \forall l \in L, t \in T$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ikt} + \sum_{j=1}^J X_{jlt} \geq \sum_{k=1}^K X_{klt} \quad \forall k \in K, t \in T$$

$$Y_i W_j \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, j \in J$$

$$X_{rr't} \geq 0 \quad \forall r \in \{I, J, K, L, O\}, \quad r' \in \{I, J, K, L, O\}, \quad t \in T$$

$$Ih_{jt} \geq 0, \lambda_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad j \in J, \quad t \in T$$

LP-Metric method

$$\text{Min } w_1 \left(\frac{f_1 - f_1^*}{f_1^*} \right)^P - w_2 \left(\frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} \right)^P + w_3 \left(\frac{f_3 - f_3^*}{f_3^*} \right)^P$$

weighted min-max method

$$\text{Min } \gamma \text{ S.t } w_1 \left(\frac{f_1 - f_1^*}{f_1^*} \right) \leq \gamma - w_2 \left(\frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} \right) \leq \gamma + w_3 \left(\frac{f_3 - f_3^*}{f_3^*} \right) \leq \gamma$$

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

El estudio logro seleccionar un modelo matemático de optimización, el mismo que se estableció mediante el desarrollo de los objetivos propuestos. Tras identificar los diversos modelos matemáticos de optimización sujetos a los objetivos ambientales en la industria manufacturera, se escogió los modelos que más se alineados, cumpliendo con las palabras claves dadas desde un principio, estableciendo que los modelos de programación lineal entero mixto se encuentra como un modelo que incorpora variables de sostenibilidad ambiental, según lo determinado al examinar la literatura.

Se estableció categorías a los criterios de modelización relacionados con la sostenibilidad ambiental, los mismo que fueron seleccionados a través de un análisis multicriterio proporcionado pesos a los parámetros seleccionados. Se consideraron criterios como las emisiones de CO₂, aguas residuales, residuos sólidos y energía; dicha clasificación dio como resultado una estructura sólida para comprender cómo estos criterios pueden ser incorporados de manera integral en el diseño de modelos matemáticos orientados a la optimización ambiental en el sector manufacturero.

Por último, mediante el análisis de multicriterio y su herramienta establecida se logró discriminar el modelo matemático más adecuado para optimizar los objetivos ambientales dados para la industria manufacturera del Ecuador, proporcionando así un enfoque claro y eficiente para mejorar la optimización en el ámbito manufacturero. Además, se consideró aspectos como la complejidad computacional, la capacidad de adaptación a diversos contextos ambientales en la toma de decisiones sostenibles. Mediante este análisis crítico permitió identificar el modelo matemático más adecuado para optimizar los objetivos ambientales específicos de la industria.

5.2 Limitaciones del estudio

Una limitación que se observó durante este estudio es la falta de acceso a información y datos pertinentes sobre el sector manufacturero, es decir, artículos completamente direccionados a el sector manufacturero. Se considera otras opciones para llegar al modelo matemático de optimización, ya que, con la búsqueda exhaustiva se descartó

ciertos modelos que también se consideran “aptos”. Por lo tanto, los resultados pueden variar según las variables establecidas y metodologías utilizadas.

5.3 Futuras temáticas de investigación

Basándonos en los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen algunas pautas recalçadas. Donde se sugiere continuar investigando y desarrollando modelos matemáticos que se adapten a los cambios en las demandas ambientales y tecnológicas. Además, estos modelos se recomiendan como una opción viable para las empresas que buscan incorporarlos en su proceso de toma de decisiones debido a los beneficios potenciales para la sostenibilidad a largo plazo. Este estudio proporciona una base sólida para futuras investigaciones y prácticas encaminadas a lograr una mayor conciencia ambiental y sostenibilidad en la fabricación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, M., & elmaraghy, H. (2018). Synthesis and optimization of manufacturing systems configuration using co-platforming. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 20, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.09.006>
- Abdulrazik, A., Noor, M. Z. M., Failaka, M. F., Elkamel, M., & Elkamel, A. (2017). Utilising biomass for renewable energy production: Optimal profitability evaluation from different processing routes. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 11(4), 3046–3057. <https://doi.org/10.15282/jmes.11.4.2017.8.0274>
- Acquatella, Jean., & United Nations. Economic Commission for Latin America and the Caribbean. Environment and Human Settlements Division. (2001). *Aplicación de instrumentos económicos en la gestión ambiental en América Latina y el Caribe : desafíos y factores condicionantes*. Naciones Unidas, CEPAL, División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos.
- Acuña, N., Figueroa, L., & Wilches, M. J. (2016). Influencia de los Sistemas de Gestión Ambiental ISO 14001 en las.
- Ahn, J., & Kang, D. (2014). Optimal planning of water supply system for long-term sustainability. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8(4), 410–420. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.08.001>
- Aktas, A., & Kabak, M. (2020). A goal programming model for grid-connected hybrid energy system operations. *SN Applied Sciences*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1878-1>
- Alashhab, M. S., & Mlybari, E. A. (2020). Developing a robust green supply chain planning optimization model considering potential risks. *International Journal of GEOMATE*, 19(73), 208–215. <https://doi.org/10.21660/2020.73.52896>
- Alcocer Quinteros, P., Knudsen González, J., Marrero Delgado, F., & Miranda Casanova, B. (2020a). Depósito legal ppi 201502ZU4662. <https://orcid.org/0000-0002-5470-2572>
- Alcocer Quinteros, P., Knudsen González, J., Marrero Delgado, F., & Miranda Casanova, B. (2020b). Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos

en Quevedo – Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*. <https://orcid.org/0000-0002-5470-2572>

Aljuneidi, T., & Bulgak, A. A. (2016). A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5–8), 1585–1596. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9141-z>

Alves, I. K. (2013). A mathematical approach to find long-term strategies for the implementation of resource-orientated sanitation. *Water Science and Technology*, 67(7), 1442–1454. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.691>

Alzate, A., Ramírez, J., & Alzate, S. (2018). 74 *Revista Chilena De Economía Y Sociedad*, Junio 2018 Modelo De Gestión Ambiental Iso 14001: Evolución Y Aporte A La Sostenibilidad Organizacional.

Andiappan, V., Benjamin, M. F. D., Tan, R. R., & Ng, D. K. S. (2019). Design, optimisation and reliability allocation for energy systems based on equipment function and operating capacity. *Heliyon*, 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02594>

Arabsheybani, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2018). An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk. *Journal of Cleaner Production*, 190, 577–591. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.167>

Asociación Latinoamericana de Desalación y Reúso de Agua. (2022, August 19). *Asociación Latinoamericana de Desalación y Reúso de Agua*.

Aznar Bellver, J., & García García, F. (2011). Una alternativa multicriterio a la valoración de empresas: aplicación a las Cajas de Ahorro A Multicriteria Alternative to Companies' Valuation: Application to a Spanish Savings Bank. www.revista-eea.net,

Banasik, A., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2017). Assessing alternative production options for eco-efficient food supply chains using multi-objective optimization. *Annals of Operations Research*, 250(2), 341–362. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2199-z>

- Banco Mundial. (2022a). Convivir con basura: el futuro que no queremos. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2019/03/06/convivir-con-basura-el-futuro-que-no-queremos>
- Banco Mundial. (2022b). Industria, valor agregado (% del PIB) | Data. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.IND.TOTL.ZS>
- Banco Mundial. (2022c, Summer 8). Llamado urgente a la acción climática en América Latina y el Caribe. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2022/09/13/banco-mundial-accion-climatica-urgente-america-latina-caribe-acelerar-transicion-bajas-emisiones-de-carbono>
- Banco Mundial. (2023a). Energía. <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Banco Mundial. (2023b). Un nuevo informe revela retrasos en el acceso a energías básicas y la necesidad de invertir en renovables. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/06/06/basic-energy-access-lags-amid-renewable-opportunities-new-report-shows>
- Bedoić, R., Dorotić, H., Schneider, D. R., Čuček, L., Ćosić, B., Pukšec, T., & Duić, N. (2021). Synergy between feedstock gate fee and power-to-gas: An energy and economic analysis of renewable methane production in a biogas plant. *Renewable Energy*, 173, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.124>
- Beheshtinia, M. A., & Fathi, M. (2023). Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry. *Energy Science and Engineering*, 11(1), 357–382. <https://doi.org/10.1002/ese3.1337>
- Beheshtinia, M. A., Feizollahy, P., & Fathi, M. (2021). Supply chain optimization considering sustainability aspects. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111873>
- Bellgran, M., & Bruch, J. (2015). Environmental Management in Manufacturing Industries. In *Handbook of Clean Energy Systems* (pp. 1–10). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces092>
- Blanco Orozco, N. V., & Giraud, L. (2022). Optimization of the environmental and economic management of the biomass energy resource for power generation in

Nicaragua. Fuentes El Reventon Energetico, 20(1), 87–103.
<https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022008>

Boukherroub, T., Ruiz, A., Guinet, A., & Fondrevelle, J. (2015). An integrated approach for sustainable supply chain planning. *Computers and Operations Research*, 54, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.09.002>

Bravo-Calle, O. E., Osorio-Rivera, M. A., & Loo-Lalvay, X. A. (2021). La calidad del desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente The quality of industrial development and its impact on the environment A qualidade do desenvolvimento industrial e seu impacto no meio ambiente. 6(9), 153–167.
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i9>

Cabrera Rodríguez, S. (2023). Aplicación De La Programacion Lineal A La Agronomía.

Cai, W., Lai, K. Hung, Liu, C., Wei, F., Ma, M., Jia, S., Jiang, Z., & Lv, L. (2019). Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Science of the Total Environment*, 665, 23–32.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.069>

Carrero-Parreño, A., Onishi, V. C., Salcedo-Díaz, R., Ruiz-Femenia, R., Fraga, E. S., Caballero, J. A., & Reyes-Labarta, J. A. (2017). Optimal Pretreatment System of Flowback Water from Shale Gas Production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(15), 4386–4398. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04016>

Casla, I. M., Khodadadi, A., & Soder, L. (2022). Optimal Day Ahead Planning and Bidding Strategy of Battery Storage Unit Participating in Nordic Frequency Markets. *IEEE Access*, 10, 76870–76883.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3192131>

Castañeda Torres, S., & Rodriguez Miranda, J. P. (2017). Modelo de aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en Cundinamarca, Colombia. *Universidad y Salud*, 19(1), 116. <https://doi.org/10.22267/rus.171901.75>

Cayir Ervural, B., Evren, R., & Delen, D. (2018). A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning. *Renewable Energy*, 126, 387–402. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.051>

- Chen, Y.-J., & Tung, C.-P. (2007). New criteria for sustainable water quality management. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(2), 372–383. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00029.x>
- Cheraghalipour, A., & Farsad, S. (2018). A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under disruption risks: A case study in plastic industry. *Computers and Industrial Engineering*, 118, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.041>
- Chin, H. H., Foo, D. C. Y., & Lam, H. L. (2019). Simultaneous water and energy integration with isothermal and non-isothermal mixing – A P-graph approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 687–713. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.007>
- Chiu, M.-C., Chung, W.-H., & Lin, H.-H. (2021). Applying DFA and goal programming to improve economic efficiency, material handling convenience, and sustainability of a product packaging system. *Research in Engineering Design*, 32(2), 157–173. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00355-4>
- Collaborative Decision Making. (2021). *Strategic Planning Software for Smarter Decisions*.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). *Transición Energética En América Latina Y El Caribe Sostenible E Inclusiva* Marina Gil Sevilla Unidad De Agua Y Energía, División De Recursos Naturales Comisión Económica Para América Latina Y El Caribe (CEPAL).
- Cornejo-Cañamares, M., Medrano, N., & Olarte-Pascual, C. (2021). Environmental objectives and non-technological innovation in Spanish manufacturing smes. *Journal of Cleaner Production*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126445>
- Costa, Y., Duarte, A., & Sarache, W. (2017). A decisional simulation-optimization framework for sustainable facility location of a biodiesel plant in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 167, 174–191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.126>
- Cueva-Vargas, H., & Cortés-Palacios, H. (2020). PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto. <http://orcid.org/0000-0001-5779-7522>

- Das, R., Topal, E., & Mardaneh, E. (2023). A review of open pit mine and waste dump schedule planning. *Resources Policy*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104064>
- De, A., Kumar, S. K., Gunasekaran, A., & Tiwari, M. K. (2017). Sustainable maritime inventory routing problem with time window constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 61, 77–95. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.02.012>
- De, A., Mamanduru, V. K. R., Gunasekaran, A., Subramanian, N., & Tiwari, M. K. (2016). Composite particle algorithm for sustainable integrated dynamic ship routing and scheduling optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 96, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.002>
- De, A., Wang, J., & Tiwari, M. K. (2020). Hybridizing basic variable neighborhood search with particle swarm optimization for solving sustainable ship routing and bunker management problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(3), 986–997. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2900490>
- Debrah, J. K., Vidal, D. G., & Dinis, M. A. P. (2021). Raising awareness on solid waste management through formal education for sustainability: A developing countries evidence review. *Recycling*, 6(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/recycling6010006>
- Dehaghi, B. F., & Khoshfetrat, A. (2020). AHP-GP approach by considering the leopold matrix for sustainable water reuse allocation: Najafabad case study, Iran. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2), 485–499. <https://doi.org/10.3311/ppci.14689>
- Dulebenets, M. A. (2022). Multi-objective collaborative agreements amongst shipping lines and marine terminal operators for sustainable and environmental-friendly ship schedule design. *Journal of Cleaner Production*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130897>
- Editors of REA. (2012). *Advanced Calculus Problem Solver* (Research & Education Association, Ed.).
- Energy Data. (2023). *Tendencias Energéticas Mundiales*, 2023. <https://es.enerdata.net/publicaciones/informes-energeticos/tendencias-energeticas-mundiales.html#top>

- Energy Go. (2023). Objetivos ambientales: definición y características | Blog energygo. <https://blog.energygo.es/glosario/definicion-objetivos-ambientales/>
- Enriquez, H. D., & Kolodziej, S. F. (2018). Simulación Y Optimización De Sistema De Manufactura Con Criterios Económico Y Ambiental Simulation Optimization Of A Manufacturing System With Economic And Environmental Criteria. *Revista Ingeniería Industrial-Año, 17*, 37–54. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.03>
- Farazmand, M., Pishvae, M. S., Ghannadpour, S. F., & Ghousi, R. (2022). Green dynamic multimodal logistics network design problem considering financing decisions: a case study of cement logistics. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(3), 4232–4245. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15867-2>
- Feitó Cespón, M., Castro, R. C., & Rubio Rodríguez, M. A. (2016). Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples productos Optimization model to sustainable design of multiple-products recycling supply chain. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 24, Issue 1).
- Florez, L., & Castro-Lacouture, D. (2013). Optimization model for sustainable materials selection using objective and subjective factors. *Materials and Design, 46*, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.013>
- França, L. C. D. J., Júnior, F. W. A., Jarochinski e Silva, C. S., Monti, C. A. U., Ferreira, T. C., Santana, C. J. D. O., & Gomide, L. R. (2022). Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review. *Trees, Forests and People, 8*. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100275>
- Francho, A. (2021). Contaminación atmosférica.
- Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- Galindro, A., Cerveira, A., Torres, D. F. M., Matias, J., & Marta-Costa, A. (2020). A Mathematical Model for Vineyard Replacement with Nonlinear Binary Control Optimization. *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity, 9*(2), 173–186. <https://doi.org/10.5890/DNC.2020.06.001>
- Gallegos, O. A. (2015). Sostenibilidad y estudios de impacto.

- Goodarzian, F., Hosseini-Nasab, H., & Fakhrzad, M. B. (2020). A multi-objective sustainable medicine supply chain network design using a novel hybrid multi-objective metaheuristic algorithm. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 33(10), 1986–1995. <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.10A.17>
- Goodarzian, F., Shishebori, D., Bahrami, F., Abraham, A., & Appolloni, A. (2023). Hybrid meta-heuristic algorithms for optimising a sustainable agricultural supply chain network considering CO2 emissions and water consumption. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23302674.2021.2009932>
- Gutiérrez Escajeda, M. T., Medellín Milán, P., & Ábrego Góngora, C. J. (2016). Investigación y Ciencia De La Universidad Autónoma Determinants of CO2 emissions associated with the use of fuels in the industrial sector of San Luis Potosi.
- Gutiérrez Franco, E., Fuquen González, H., & Abril Hernández, D. (2010). Planificación integrada de producción y distribución para un conglomerado industrial. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 53, 88–105. http://www.scielo.org.co/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0120-623020100003000008&lang=es
- Gutiérrez, H., Morán, C., & Posas, R. (2019). Determinants of capital structure: An empirical study of the manufacturing sector at Ecuador. *Contaduría y Administración*, 64(2), 1–18. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2018.1848>
- Harijani, A. M., Mansour, S., & Fatemi, S. (2023). Closed-loop supply network of electrical and electronic equipment under carbon tax policy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(32), 78449–78468. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27443-x>
- Harraz, N. A., & Galal, N. M. (2011). Design of Sustainable End-of-life Vehicle recovery network in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(3–4), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.09.006>
- Heidari-Fathian, H., & Pasandideh, S. H. R. (2018). Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation.

Computers and Industrial Engineering, 122, 95–105.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.051>

Hosseini-Motlagh, S.-M., Samani, M. R. G., & Saadi, F. A. (2020). A novel hybrid approach for synchronized development of sustainability and resiliency in the wheat network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105095>

How, B. S., Tan, K. Y., & Lam, H. L. (2016). Transportation decision tool for optimisation of integrated biomass flow with vehicle capacity constraints. *Journal of Cleaner Production*, 136, 197–223. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.142>

Hu, Z., Chen, Y., Yao, L., Wei, C., & Li, C. (2016). Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity-efficiency tradeoff. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 102–113.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.001>

Ibarra-Taquez, H. N., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez, M. Á. (2018). Multi-objective optimization of the Fenton process for the treatment of soluble coffee wastewater. *Informacion Tecnologica*, 29(5), 111–121. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500111>

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2020). Consumo eléctrico por habitante continúa creciendo en Ecuador – Instituto de Investigación Geológico y Energético. <https://www.geoenergia.gob.ec/consumo-electrico-por-habitante-continua-creciendo-en-ecuador/>

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2021). Marzo 2016.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). Resumen Estadístico.

Instituto nacional de estadísticas y censos. (2020). Producción de la Industria Manufacturera.

International Energy Agency. (2021). IEA – International Energy Agency.
<https://www.iea.org/>

International Energy Agency. (2022). IEA – International Energy Agency - IEA.
<https://www.iea.org/sankey/>

- International Organization for Standardization. (2015). ISO - About us. <https://www.iso.org/about-us.html>
- Jabarzadeh, Y., Reyhani Yamchi, H., Kumar, V., & Ghaffarinasab, N. (2020). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1351–1373. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0276>
- Jian, T., Meng, L., & Li-Na, Y. (2019). Comparative study on optimum production decision of enterprise under the carbon quota mechanism based on historical emissions (An environmental perspective). *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 20(3), 1544–1553. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?Eid=2-s2.0-85081542172&partnerid=40&md5=215b65afd952c6a4cd9259235e37ef77>
- Kalitventzeff, B., Maréchal, F., & Closon, H. (2001). Better solutions for process sustainability through better insight in process energy integration. *Applied Thermal Engineering*, 21(13–14), 1349–1368. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00024-2)
- Kleiner, J. (2020). Mathematical models of consciousness. *Entropy*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/E22060609>
- Kumari, S., & Bera, S. (2022). A decision analysis model for reducing carbon emission from coal-fired power plants and its compensatory units. *Journal of Environmental Management*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113829>
- Latif, H. H., Gopalakrishnan, B., Nimbarte, A., & Currie, K. (2017). Sustainability index development for manufacturing industry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.010>
- Latinopoulos, D. (2005). Derivation of irrigation water demand functions through linear and non-linear optimisation models: Application to an intensively irrigated area in northern Greece. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(6), 75–84. <https://doi.org/10.2166/ws.2005.0052>
- Li, R., Zhang, X., Jiang, L., Yang, Z., & Guo, W. (2022). An adaptive heuristic algorithm based on reinforcement learning for ship scheduling optimization problem. *Ocean and Coastal Management*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106375>

- Linares, P., Ramos, A., Sánchez-Martín, P., & Vitoriano, B. (2014). Modelos Matemáticos De Optimización. <https://www.researchgate.net/publication/237494291>
- Loganath, R., & Senophiyah-Mary, J. (2020). Critical review on the necessity of bioelectricity generation from slaughterhouse industry waste and wastewater using different anaerobic digestion reactors. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110360>
- López, S., Chung, P., & Ramírez, M. Del P. (2021). Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método multicriterio para la localización óptima de estaciones intermodales. *Economía Sociedad y Territorio*, 21(66), 315–358. <https://doi.org/10.22136/est20211583>
- Lozano Gómez, P., & Barbarán Mozo, H. P. (2021). La gestión ambiental en los gobiernos locales en América Latina. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(1), 212–228. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i1.221
- Mahjoub, N., & Sahebi, H. (2020). The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model. *Ecological Indicators*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106799>
- Malavé, E., & Fernández, M. (2019). La Lectura Como Un Proceso Formador De Ciudadanos: Algunas Apreciaciones Según Andrés Bello. *Revista Electrónica Sinergias Educativas*, 4(1). <https://doi.org/10.31876/s.e.v4i1.30>
- Mamashli, Z., Nayeri, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sazvar, Z., & Javadian, N. (2021). Designing a sustainable–resilient disaster waste management system under hybrid uncertainty: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104459>
- Mendoza, A., Solano¹, C., Palencia¹, D., & Garcia¹, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 27, Issue 3).
- Mercado, V., & Peña, B. (2016). Modelo de gestión de mantenimiento enfocado en la eficiencia y optimización de la energía eléctrica model of management of

maintenance focused in the efficiency and optimization of the electric power ciencias básicas y tecnología. 28(1), 99–105.

Ming, E. C. L., Ma, N. L., & Tan, K. W. (2014). Reducing carbon emission of ocean shipments by optimizing container size selection. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2014-January, 480–485. <https://doi.org/10.1109/coase.2014.6899369>

Ministerio de Energia y Minas. (2021). *Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2021-2*.

Ministerio de Energia y Minas. (2022, December 30). Ecuador avanza hacia la disminución de emisiones de CO2 en el sector eléctrico – Ministerio de Energia y Minas. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/ecuador-avanza-hacia-la-disminucion-de-emisiones-de-co2-en-el-sector-electrico/>

Ministerio del Ambiente, A. Y T. E. (2022). *Resumen Estadístico Gestión de Agua Potable y Saneamiento de GAD Municipales*.

Mirdar Harijani, A., & Mansour, S. (2022). Municipal solid waste recycling network with sustainability and supply uncertainty considerations. *Sustainable Cities and Society*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103857>

Mirdar Harijani, A., Mansour, S., Karimi, B., & Lee, C.-G. (2017). Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste – A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 151, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.030>

Mirzoieva, T., Heraimovych, V., Loshakova, Y., Tripak, M., & Humeniuk, I. (2021). Optimization of the sown areas structure as a tool for the development of medicinal crop production on the basis of sustainability and regenerative agriculture. *E3S Web of Conferences*, 244. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124403027>

Momenitabar, M., Dehdari Ebrahimi, Z., Arani, M., Mattson, J., & Ghasemi, P. (2022). Designing a sustainable closed-loop supply chain network considering lateral resupply and backup suppliers using fuzzy inference system. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02332-4>

- Monge, C., Cruz, J., & López, F. (2013). Impacto de la Manufactura Esbelta, Manufactura Sustentable y Mejora Continua en la Eficiencia Operacional y Responsabilidad Ambiental en México. *Información tecnológica*, 24(4), 15–32. [Http://www.scielo.cl/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000400003&lang=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000400003&lang=es)
- Montoya, O. D., Gil-González, W., & Molina-Cabrera, A. (2021). Exact minimization of the energy losses and the CO2 emissions in isolated DC distribution networks using PV sources. *DYNA (Colombia)*, 88(217), 178–184. [Https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93099](https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93099)
- Motevalli-Taher, F., Paydar, M. M., & Emami, S. (2020). Wheat sustainable supply chain network design with forecasted demand by simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178. [Https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105763](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105763)
- Mrabti, N., Hamani, N., & Delahoche, L. (2021). The pooling of sustainable freight transport. *Journal of the Operational Research Society*, 72(10), 2180–2195. [Https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1772022](https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1772022)
- Mukhopadhyay, M. K., & Sinha, I. N. (2006). A techno-economic model for optimum regeneration of surface mined land. *Environmental Geology*, 50(5), 669–676. [Https://doi.org/10.1007/s00254-006-0240-2](https://doi.org/10.1007/s00254-006-0240-2)
- Muñoz, B., & Romana, M. G. (2016). Application of Multicriteria Decision Methods in Evaluating Alternative Solutions for Transportation Facilities.
- Muñoz Guillermo, M. (2023). Programación Lineal Matemáticas I.
- Naciones Unidas Asamblea General. (1987). Naciones Unidas Asamblea General.
- National Geographic. (2023). Un enorme iceberg del tamaño de Londres se desprende de la Antártida. [Https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/enorme-iceberg-tamano-londres-se-desprende-antartida_19434?Utm_source=twitter&utm_medium=social&utm_campaign=tráfico](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/enorme-iceberg-tamano-londres-se-desprende-antartida_19434?Utm_source=twitter&utm_medium=social&utm_campaign=tráfico)
- Nayeri, S., Paydar, M. M., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (2020). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network

design. *Computers and Industrial Engineering*, 148.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106716>

Niranjan, T., Parthiban, P., Sundaram, K., & Jeyaganesan, P. N. (2019). Designing a omnichannel closed loop green supply chain network adapting preferences of rational customers. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 44(3).
<https://doi.org/10.1007/s12046-018-1038-0>

Nour, A., Galal, N. M., & El-Kilany, K. S. (2017). Energy-based aggregate production planning for porcelain tableware manufacturer in Egypt. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2351–2358. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?Eid=2-s2.0-85018953670&partnerid=40&md5=992e853def9e42ec26127258ba40e2fe>

Nujoom, R., Mohammed, A., & Wang, Q. (2018). A sustainable manufacturing system design: A fuzzy multi-objective optimization model. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 24535–24547. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9787-6>

Nunes, L. J. R., & Silva, S. (2023). Optimization of the Residual Biomass Supply Chain: Process Characterization and Cost Analysis. *Logistics*, 7(3).
<https://doi.org/10.3390/logistics7030048>

Okoye, C. O., Solyali, O., & Akintu¹, B. (2015). Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 131–140.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.015>

Oliveira, C., Baptista, J., & Cerveira, A. (2023). Self-Sustainability Assessment for a High Building Based on Linear Programming and Computational Fluid Dynamics. *Algorithms*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/a16020107>

Olvera Lara, Y. O., & Olvera Lara, Y. (2018). El contenido de la presente publicación refleja los puntos de vista del autor, que no necesariamente coinciden con la Secretaría de Marina-Armada de México.

ONU. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks

- Organización de las Naciones Unidas. (2022). Los países son incapaces de doblar la curva de las emisiones: el CO2 y el metano marcan un récord histórico | Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2022/10/1516392>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023, February 2). El Día Mundial del Medio Ambiente 2023 se centrará en las soluciones a la contaminación por plásticos con Côte d'Ivoire como país anfitrión. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-dia-mundial-del-medio-ambiente-2023-se-centrara-en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la C. Y la C. (2017). Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Las aguas residuales: el recurso desaprovechado, resumen ejecutivo; 2017.
- Organización Latinoamericana de Energía. (2020). Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y sus perspectivas. <http://sielac.olade.org/>
- Orjuela-Castro, J. A., Aranda-Pinilla, J. A., & Moreno-Mantilla, C. E. (2019). Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia. *Computers and Electronics in Agriculture*, 161, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.009>
- Osmani, A., & Zhang, J. (2013). Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties. *Energy*, 59, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.043>
- Osmani, A., & Zhang, J. (2017). Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain – A logistic case study in Midwestern United States. *Land Use Policy*, 61, 420–450. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.028>
- Oudani, M. (2023). A combined multi-objective multi criteria approach for blockchain-based synchromodal transportation. *Computers and Industrial Engineering*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108996>
- Oudani, M., Sebbar, A., Zkik, K., El Harraki, I., & Belhadi, A. (2023). Green Blockchain based iot for secured supply chain of hazardous materials. *Computers and Industrial Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108814>

- Page, M. J., mckenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., mcdonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pataca Rodríguez, F., & Flores, E. (2022). Desarrollo sostenible desde la educación ambiental en Latinoamérica: Una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 1981–2000. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2348
- Pati, R. K., & Vrat, P. (2010). Economic paper blending optimization model with competing materials. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 21(5), 602–617. <https://doi.org/10.1108/14777831011067917>
- Pavan, J. V., Masachessi, G., Prez, V. E., Di Cola, G., Re, V. E., & Nates, S. V. (2022). Evaluación de la calidad de aguas superficiales en espacios recreacionales, una propuesta integradora de marcadores químicos y microbiológicos. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas de Córdoba*, 79(2), 210–214. <https://doi.org/10.31053/1853.0605.v79.n2.33403>
- Pérez Peña, Rodrigo. (2019). *Introducción a los modelos de optimización*. Universidad Piloto de Colombia.
- Pourjavad, E., & Mayorga, R. V. (2018). Optimization of a sustainable closed loop supply chain network design under uncertainty using multi-objective evolutionary algorithms. *Advances in Production Engineering And Management*, 13(2), 216–228. <https://doi.org/10.14743/apem2018.2.286>
- Prajapati, D., Zhou, F., Dwivedi, A., Singh, T., Lakshay, L., & Pratap, S. (2022). Sustainable Agro-Food Supply Chain in E-Commerce: Towards the Circular Economy. *Sustainability* (Switzerland), 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148698>
- Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas. (2018, October 21). Aumenta la generación de residuos en América Latina y el Caribe mientras 145.000 toneladas aún se disponen de forma inadecuada cada día.

- Puchongkawarin, C., & Mattaraj, S. (2020). Development of a superstructure optimization framework for the design of municipal solid waste facilities. *Sustainable Environment Research*, 30(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00071-7>
- Rajak, S., Vimal, K. E. K., Arumugam, S., Parthiban, J., Sivaraman, S. K., Kandasamy, J., & Duque, A. A. (2022). Multi-objective mixed-integer linear optimization model for sustainable closed-loop supply chain network: a case study on remanufacturing steering column. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 6481–6507. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01713-5>
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2022). Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(4–5), 837–877. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1926950>
- Ransikarbum, K., & Pitakaso, R. (2024). Multi-objective optimization design of sustainable biofuel network with integrated fuzzy analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122586>
- Rendón Acebedo, J. A., González Vásquez, D. M., & Zapata Pérez, D. M. (2017). *Economía, industria y medio ambiente*.
- Resat, H. G., & Unsal, B. (2019). A novel multi-objective optimization approach for sustainable supply chain: A case study in packaging industry. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.008>
- Riveros-Gavilanes, J. M., & Reyes-Vargas, A. M. (2023). Contaminación por CO₂ y crecimiento económico: ¿Un comportamiento heterogéneo para América Latina? *Sociedad y Economía*, e10612013. <https://doi.org/10.25100/sye.v0i48.12013>
- Robles, N. (2017). Sostenibilidad de la Cadena de Suministros mediante el Control de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2017-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.304>
- Sacchelli, S., Bernetti, I., De Meo, I., Fiori, L., Paletto, A., Zambelli, P., & Ciolli, M. (2014). Matching socio-economic and environmental efficiency of wood-residues energy chain: A partial equilibrium model for a case study in Alpine area. *Journal of Cleaner Production*, 66, 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.059>

- Salazar, G. (2017). Determinant factors of financial performance in the manufacturing sector in the Republic of Equator. In *Panorama Económico* (Vol. 25, Issue 2).
- Salazar López, B. (2019). Programación lineal» Investigación de Operaciones. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/programacion-lineal/>
- Salazar López, B. (2023). Programación lineal. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/metodografico/>
- Sandoval, C. (2020). Productividad del proceso minero, mas allá de la producción Universidad. *Ciencia Y Tecnología*, 24, 74–87. <http://orcid.org/0000-0001-5980-292X>
- Sarkar, B., Omair, M., & Choi, S.-B. (2018). A multi-objective optimization of energy, economic, and carbon emission in a production model under sustainable supply chain management. *Applied Sciences* (Switzerland), 8(10). <https://doi.org/10.3390/app8101744>
- Sarkar, B., Ullah, M., & Kim, N. (2017). Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items. *Computers and Industrial Engineering*, 111, 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.003>
- Sazvar, Z., Tafakkori, K., Oladzad, N., & Nayeri, S. (2021). A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107406>
- Segura, Á., Rojas, L., & Pulido, Y. (2020). Sistemas de gestión de residuos sólidos.
- Shabbar, R., & Sayama, H. (2023). Health information exchange network under collaboration, cooperation, and competition: A game-theoretic approach. *Health Care Management Science*, 26(3), 516–532. <https://doi.org/10.1007/s10729-023-09640-9>
- Shahinzadeh, H., Moradi, J., Gharehpetian, G. B., Fathi, S. H., & Abedi, M. (2018). Optimal Energy Scheduling for a Microgrid Encompassing drs and Energy Hub

Paradigm Subject to Alleviate Emission and Operational Costs. Proceedings - 2018 Smart Grid Conference, SGC 2018. <https://doi.org/10.1109/SGC.2018.8777808>

Sharma, N. R., Mishra, A. K., & Jain, S. (2021). Impact factor improvement and maintenance schedule optimisation of mining shovels by remaining useful life and linear programming. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 69(9), 315–326. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?Eid=2-s2.0-85118764051&partnerid=40&md5=f4d8077062f8fbf53053c076b3758672>

Solíz Torres, M., Instituto Nacional de Estadística y Censos, & Ministerio del ambiente. (2020). *Cartografía-residuos-sólidos-Ecuador-2020*.

Stewart, R. R., & Martel, M. (1995). Application of a bioeconomic strategic planning model to an industrial forest in saskatchewan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 82(1–2), 43–55. <https://doi.org/10.1007/BF01182817>

Tan, R. R., Aviso, K. B., & Ng, D. K. S. (2019). Optimization models for financing innovations in green energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109258>

Tascione, V., Mosca, R., & Raggi, A. (2021). A proposal of an economic optimization model for sustainable waste management. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123581>

Taskhiri, M. S., Tan, R. R., & Chiu, A. S. F. (2011). Emergy-based fuzzy optimization approach for water reuse in an eco-industrial park. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 730–737. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.001>

Theo, W. L., Lim, J. S., Wan Alwi, S. R., Mohammad Rozali, N. E., Ho, W. S., & Abdul-Manan, Z. (2016). An MILP model for cost-optimal planning of an on-grid hybrid power system for an eco-industrial park. *Energy*, 116, 1423–1441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.043>

Tirkolaee, E. B., Goli, A., Ghasemi, P., & Goodarzian, F. (2022). Designing a sustainable closed-loop supply chain network of face masks during the COVID-19 pandemic: Pareto-based algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130056>

- Toskano Hurtado, G. (2020). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la.
- Valdez Jaimes, M. A., Ríos Nequis, E. I., & Hernández Bejarano, J. (2020). La relación entre la sostenibilidad económica, social y ambiental en la industria manufacturera de Mexicali, Baja California, México the relationship between economic, social and environmental sustainability in the manufacturing industry Of Mexicali, Baja California, Mexico (Vol. 13, Issue 75).
- Vali-Siar, M. M., & Roghanian, E. (2022). Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 278–300. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.003>
- Vega, R., Arellano, N., & Vega, G. (2020). Optimización Ambiental de Proyectos.
- Villagómez, G., Viteri, J., & Medina, A. (2012). Teoría de restricciones para procesos de manufactura Palabras clave.
- Visualizing Scientific Landscapes. (2019). Vosviewer.
- Vivas, R. D. C., Sant'Anna, A. M. O., Esquerre, K. P. S. O., & Freires, F. G. M. (2020). Integrated method combining analytical and mathematical models for the evaluation and optimization of sustainable supply chains: A Brazilian case study. *Computers and Industrial Engineering*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.044>
- Walker, D. B., Baumgartner, D. J., Gerba, C. P., & Fitzsimmons, K. (2019). Surface Water Pollution. In *Environmental and Pollution Science* (pp. 261–292). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00016-1>
- Weiss, P. T., Lefevre, G., & Gulliver, J. S. (2021). Contamination of Soil and Groundwater Due to Stormwater Infiltration Practices A Literature Review Minneapolis, Minnesota. <http://www.safl.umn.edu/http://proteus.pca.state.mn.us/water/stormwater/index.html>
- Xu, J., Wang, K., Sheng, H., Gao, M., Zhang, S., & Tan, J. (2020). Energy efficiency optimization for ecological 3D printing based on adaptive multi-layer customization. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118826>

- Yacob, P., Wong, L. S., & Khor, S. C. (2019). An empirical investigation of green initiatives and environmental sustainability for manufacturing smes. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(1), 2–25. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2017-0153>
- Yang, S., Xiong, J., Cao, D., & Wu, J. (2023). A Coordination Optimization for Train Operation and Energy Infrastructure Control in a Metro System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3318981>
- Yousefi Yegane, B., Nakhai Kamalabadi, I., & Farughi, H. (2016). A non-linear integer bi-level programming model for competitive facility location of distribution centers. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 29(8), 1131–1140. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?Eid=2-s2.0-84984637702&partnerid=40&md5=2cfe1e1faca06a0dedd3440ab0cfb226>
- Zapata, K., Nieves, W., & del Cisne Vega, A. (2022). Manufactura y Crecimiento Económico en Ecuador, 1990-2019: Validez de la primera ley de Kaldor. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 5(1), 169–178.
- Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, 28, 409–423. <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>
- Zhang, J., Osmani, A., Awudu, I., & Gonela, V. (2013). An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain. *Applied Energy*, 102, 1205–1217. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.054>
- Zhang, Z., Wu, L., Jia, S., & Peng, T. (2020). Multi-objective parameter optimization to support energy-efficient peck deep-hole drilling processes with twist drills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11–12), 4913–4932. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04967-x>

ANEXOS

Anexo 1

Modelización del Modelo-01

Función Objetivo, minimizar Z1:

$$Z1 = \sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} (C_{ijp} + C_j) + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_v X_{jkqv} (C_{jkqv} + C_k) + \sum_j \sum_l \sum_t X_{jlt} (C_{jlt} + C_l) + \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} (C_{jmw}) \\ + \sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} (C_{kosv}) + \sum_l \sum_r \sum_u X_{lru} (C_{lru})$$

Función Objetivo, minimizar Z2:

$$Z2 = \sum_p D_{ijp} (Y_{ijp}) + \sum_q D_{ikq} (Y_{jkqv}) + \sum_w D_{jmw} (Y_{jmw}) + \sum_t D_{jlt} (Y_{jlt}) + \sum_s D_{kos} (Y_{kos}) + \sum_u D_{lru} (Y_{lru})$$

Función Objetivo, maximizar Z3:

$$Z3 = \sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} + \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} + \sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} + \sum_l \sum_r \sum_u X_{lru}$$

Función Objetivo, maximizar Z4:

$$Z4 = I_a \left(\sum_j \sum_k \sum_q \sum_v X_{jkqv} + \sum_j \sum_l \sum_t X_{jlt} \right) + I_c \left(\sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} + \sum_l \sum_r \sum_u X_{lru} \right) \\ - I_b \left(\sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} + \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} \right) - I_d \left(\sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} \right)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} \leq C_{sj}, \quad \forall j \quad (16)$$

$$\sum_j \sum_k \sum_q \sum_v X_{jkqv} \leq C_{tk}, \quad \forall k \quad (17)$$

$$\sum_j \sum_l \sum_t X_{jlt} \leq C_{cl}, \quad \forall l \quad (18)$$

$$\sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} \leq J_{rsm}, \quad \forall m \quad (19)$$

$$\sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} \geq D_{cov}, \quad \forall o, v \quad (20)$$

$$\sum_j \sum_r \sum_u X_{lru} \geq D_{cr}, \quad \forall r \quad (21)$$

$$0 \leq \sum_i \sum_j \sum_p Y_{ijp} \leq 1, \quad \forall p \text{ entero} \quad (22)$$

$$M(Y_{ijp}) \geq X_{ijp}, \quad \forall i, j, p \text{ enteros} \quad (23)$$

$$\sum_j \sum_k \sum_q \sum_v (Y_{jkqv}) \leq 1, \quad \forall q \quad (24)$$

$$M(Y_{jkqv}) \geq X_{jkqv}, \quad \forall j, k, q, v \text{ enteros} \quad (25)$$

$$\sum_j \sum_l \sum_t (Y_{jlt}) \leq 1, \quad \forall t \quad (26)$$

$$M(Y_{jlt}) \geq X_{jlt} \quad \forall j, l, t \text{ enteros} \quad (27)$$

$$\sum_j \sum_m \sum_w (Y_{jmw}) \leq 1, \quad \forall j, m, w \text{ enteros} \quad (28)$$

$$M(Y_{jmw}) \geq X_{jmw}, \quad \forall j, m, w \text{ enteros} \quad (29)$$

$$\sum_k \sum_o \sum_s (Y_{kos}) \leq 1, \quad \forall k, o, s \text{ enteros} \quad (30)$$

$$M(Y_{kos}) \geq X_{kos}, \quad \forall k, o, s \text{ enteros} \quad (31)$$

$$\sum_l \sum_r \sum_u (Y_{lru}) \leq 1, \quad \forall l, r, u \text{ enteros} \quad (32)$$

$$M(Y_{lru}) \geq X_{lru}, \quad \forall l, r, u \text{ enteros} \quad (33)$$

$$X_{ijp} \leq C_{vijp} * C_p, \quad \forall i, j, p \text{ enteros} \quad (34)$$

$$C_{vijp} = \frac{T_t}{T_{cpi} + T_{pij} + T_{dpj}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (35)$$

$$T_{pij} = d_{ij} / \tilde{V}_{pij} \quad (36)$$

$$X_{jkq} \leq C_{vjkq} (C_q), \quad \forall j, k, q \text{ enteros} \quad (37)$$

$$C_{vjkq} = \frac{T_t}{T_{cqj} + T_{qjk} + T_{dqk}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (38)$$

$$T_{qjk} = d_{jk} / \tilde{V}_{qjk} \quad (39)$$

$$X_{jlt} \leq C_{vjlt} (C_t), \quad \forall j, l, t \text{ enteros} \quad (40)$$

$$C_{vjlt} = \frac{T_t}{T_{ctj} + T_{tjl} + T_{dtl}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (41)$$

$$T_{tjl} = d_{jl} / \tilde{V}_{tjl} \quad (42)$$

$$X_{jmw} \leq C_{vjmw} (C_w), \quad \forall j, m, w \text{ enteros} \quad (43)$$

$$C_{vjmw} = \frac{T_t}{T_{cwj} + T_{wjm} + T_{dwm}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (44)$$

$$T_{wjm} = d_{jm} / \tilde{V}_{wjm} \quad (45)$$

$$X_{kos} \leq C_{vkos} (C_s), \quad \forall k, o, s \text{ enteros} \quad (46)$$

$$C_{vkos} = \frac{T_t}{T_{csk} + T_{sko} + T_{dso}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (47)$$

$$T_{sko} = d_{ko} / \tilde{V}_{sko} \quad (48)$$

$$X_{lru} \leq C_{vlru} (C_s), \quad \forall l, r, u \text{ enteros} \quad (49)$$

$$C_{vlru} = \frac{T_t}{T_{clu} + T_{lru} + T_{dru}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (50)$$

$$T_{lru} = d_{lr} / \tilde{V}_{lru} \quad (51)$$

$$C_{ijp} = C_{vijp} * (C_{up}) \quad (52)$$

$$C_{ikq} = C_{vjikq} * (C_{uq}) \quad (53)$$

$$C_{ilt} = C_{vjilt} * (C_{ut}) \quad (54)$$

$$C_{jmw} = C_{vjmw} * (C_{uw}) \quad (55)$$

$$C_{kos} = C_{vkos} * (C_{us}) \quad (56)$$

$$C_{lru} = C_{vlru} * (C_{um}) \quad (57)$$

Anexo 2

Modelización del Modelo-02

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \underbrace{W_1 \times \sum_{j=1}^{No} \text{Delivery}_j}_{\text{obj}_1} + \underbrace{W_2 \times \sum_{j=1}^{No} \sum_{s=1}^{Ns} \text{SE}_{js} \times x_{js}}_{\text{obj}_2} + \\
 & \underbrace{W_3 \times \sum_{m=1}^{Nv} \sum_{b=1}^{No} \sum_{s=1}^{Ns} \text{VE}_m \times (rST_{mbs} \times \text{dis}ST_{ms} + rTS_{mbs} \times \text{dis}TS_{ms}) + \sum_{m=1}^{Nv} \sum_{b=1}^{No} \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{s'=1}^{Ns} \text{VE}_m \times (rSS_{mbs's'} \times \text{dis}SS_{mss'})}_{\text{obj}_3} \\
 & - \underbrace{W_4 \times \sum_{j=1}^{No} \sum_{s=1}^{Ns} \text{Quality}_{js} \times x_{js}}_{\text{obj}_4}
 \end{aligned}$$

S.t:

$$\sum_{s=1}^{Ns} xx_{sj} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, No \quad (2)$$

$$xx_{sj} = 0 \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, \dots, No \\ s = 1, \dots, Ns \setminus \text{allow}(j, s) = 0 \end{array} \quad (3)$$

$$co_j \geq \frac{Pt_j}{PR_s} - M(1 - xx_{sj}) \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, \dots, No \\ s = 1, 2, \dots, Ns \end{array} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 -M*(2 + y_{jk} - xx_{sj} - xx_{sk}) &\geq co_k + \frac{Pt_j}{PR_s} & j, k = 1, 2, \dots, No \mid j < k \\
 +M*(3 - y_{jk} - xx_{sj} - xx_{sk}) &\geq co_j + \frac{Pt_k}{PR_s} & s = 1, 2, \dots, Ns
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$y_{jk} = 0 \quad j, w = 1, 2, \dots, No \mid j \geq w \quad (6)$$

$$st_j = co_j - Pt_j \quad j = 1, 2, \dots, No \quad (7)$$

$$\begin{array}{l} x_{si} = xx_{sj} \\ s = 1, 2, \dots, Ns \\ i = 1, 2, \dots, Nc, \\ j = 1, 2, \dots, No \mid \text{belong}(j, i) = 1 \end{array} \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^{Nv} \sum_{b=1}^{No} \sum_{p=1}^{Nc} V_{mbip} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, Nc \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{Nc} V_{mbip} \leq 1 \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, No \\ p = 1, 2, \dots, Nc \end{array} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Nc} V_{mbip} \leq Cap_m \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, No \end{array} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{Nc} V_{mbi(p+1)} \leq \sum_{i=1}^{Nc} V_{mbip} \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, No \\ p = 1, 2, \dots, Nc - 1 \end{array} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{Nc} V_{m(b+1)i1} \leq \sum_{i=1}^{Nc} V_{mbi1} \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, Nc - 1 \end{array} \quad (13)$$

$$Load_i \geq av_i \quad i = 1, 2, \dots, Nc \quad (14)$$

$$Load_i \geq st_j + l \times \frac{pl_j}{size_j} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, Nc, \\ j = 1, 2, \dots, Nolsubset(i, j, l) = 1 \end{array} \quad (15)$$

$$av_i \geq \frac{disTS_s}{VS_m} - M \times (2 - V_{mbi1} - x_{is}) \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, Nc \\ m = 1, 2, \dots, Nv \\ s = 1, \dots, Ns \end{array} \quad (16)$$

$$av_i \geq Arrive_{m(b-1)} + \frac{disTS_s}{VS_m} - M \times (2 - V_{mbi1} - x_{is}) \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, Nc \\ m = 1, 2, \dots, Nv \\ s = 1, \dots, Ns \\ b = 2, \dots, Nc \end{array} \quad (17)$$

$$av_i \geq Load_q + \frac{disSS_{srs}}{VS_m} - M \times (4 - V_{mbqp} - V_{mbi(p+1)} - x_{qs'} - x_{is}) \quad \begin{array}{l} i, q = 1, 2, \dots, Nc \\ m = 1, 2, \dots, Nv \\ s, s' = 1, \dots, Ns \\ b = 1, 2, \dots, Nc \\ p = 1, 2, \dots, Nc - 1 \end{array} \quad (18)$$

$$Arrive_{mb} \geq Load_i + \frac{disST_s}{VS_m} - M \times \left(2 - \sum_{p=1}^{Nc} V_{mbip} - x_{is} \right) \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, Nc \\ m = 1, 2, \dots, Nv \\ s = 1, \dots, Ns \\ b = 2, \dots, Nc \end{array} \quad (19)$$

$$Del_i \geq Arrive_{mb} - M \times \left(1 - \sum_{p=1}^{Nc} V_{mbip} \right) \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, Nc \\ i = 1, 2, \dots, Nc \end{array} \quad (20)$$

$$Delivery_j \geq Del_i \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, \dots, No \\ i = 1, 2, \dots, Nc \text{ belong}(j, i) = 1 \end{array} \quad (21)$$

$$rTS_{mbs} \geq V_{mbi1} + x_{is} - 1 \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, Nc \\ i = 1, 2, \dots, Nc \\ s = 1, \dots, Ns \end{array} \quad (22.1)$$

$$rST_{mbs} \geq V_{mbip} - \sum_{q=1}^{Nc} V_{mbq(p+1)} + x_{is} - 1 \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, Nc \\ p = 1, 2, \dots, Nc - 1 \\ i = 1, 2, \dots, Nc \\ s = 1, \dots, Ns \end{array} \quad (22.2)$$

$$rST_{mbs} \geq V_{mbi(N_c)} + x_{is} - 1 \quad \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, Nv \\ b = 1, 2, \dots, Nc \\ i = 1, 2, \dots, Nc \\ s = 1, \dots, Ns \end{array} \quad (22.3)$$

$$rSS_{mbsrs} \geq V_{mbqp} + V_{mbi(p+1)} + x_{qs'} + x_{is} - 3 \quad \begin{array}{l} i, q = 1, 2, \dots, Nc \\ m = 1, 2, \dots, Nv \\ s, s' = 1, \dots, Ns \\ b = 1, 2, \dots, Nc \\ p = 1, 2, \dots, Nc - 1 \end{array} \quad (22.4)$$

Anexo 3

Modelización del Modelo-01

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad (1)$$

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^n n_{ij}}{n}, \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}; \quad CI = \lambda_{\max} - \frac{n}{n-1}; \quad \lambda_{\max} = \sum_{(i=1)}^n PS_i / w_i / n; \quad (3)$$

$$PS_i = \sum_{(i=1)}^n q_{ij} / n; \quad q_{ij} = a_{ij} / w_i.$$

$$R_i = \sum_{i=1}^k w_k \times r_{ik}, \quad (4)$$

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = 1 \quad (5)$$

$$E_1 + p_1 E_3 + E_3 + p_2 E_3 + p_3 E_3 = 1. \quad (6)$$

$$E_3 = \frac{1 - E_1}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5} \quad (7)$$

$$E_2 = \frac{p_1(1 - E_1)}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5}, \quad E_4 = \frac{p_2(1 - E_1)}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5} \quad (8)$$

$$E_5 = \frac{p_3(1 - E_1)}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5},$$

$$\text{Net privilege number for impact} = \text{magnitude of effect} \times \text{significance of effect.} \quad (9)$$

$$\text{minz} = \sum_{i=1}^G (W_i^- D_i^- + W_i^+ D_i^+). \quad (10)$$

$$\text{minz} = \sum_{i=1}^G \left(\frac{U_i^- D_i^- + U_i^+ D_i^+}{g_i} \right). \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^G A_{ij}T_j + D_i^- - D_i^+ = g_i, \text{ for } i = 1, \dots, M. \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n A_{ij}T_j \leq, =, \geq, \text{ for } i = M + 1, \dots, m. \quad (13)$$

$$R(T_1) = \begin{pmatrix} r(T_1E_1) \times r(E_1) + r(T_1E_2) \times r(E_2) \\ +r(T_1E_3) \times r(E_3) + r(T_1E_4) \times r(E_4) \\ +r(T_1E_5) \times r(E_5) + r(T_1E_6) \times r(E_6) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$= 0.2547; R(T_2) = 0.5547 \text{ and } R(T_3) = 0.1907.$$

$$T_1 + T_2 + T_3 \leq 420. \quad (15)$$

$$T_1 \geq 120; T_2 \geq 260 \text{ and } T_3 \geq 150. \quad (16)$$

$$\text{Max } \sum_{i=1}^m A_{ij} * T_i : \text{Maximization or minimization of all} \\ \text{criteria per } \frac{l}{s} \text{ of water reuse allocation} \quad (17)$$

$$28*T_1 + 20*T_2 - 11*T_3 \geq 28.$$

$$-18*T_1 - 6*T_2 - 2*T_3 \leq -2. \quad (18)$$

$$4*T_1 + 3*T_2 + 14*T_3 \geq 14. \quad (19)$$

$$-2*T_1 + 6*T_2 - 3*T_3 \geq 6. \quad (20)$$

$$2*T_1 + 4*T_2 + T_3 \geq 4. \quad (21)$$

s.t

$$\begin{aligned}
28 * T_1 + 20 * T_2 - 11 * T_3 + D_1^- - D_1^+ &= A_1; && \text{For environmental goal.} \\
A_1 + e_1^- - e_1^+ &= 28; && \text{the more the better} \\
-11 \leq A_1 \leq 28; &&& \text{For } |A_1 - g_{1,\max}| \\
-18 * T_1 - 6 * T_2 - 2 * T_3 + D_2^- - D_2^+ &= A_2; && \text{For risk-based goal.} \\
A_2 + e_2^- - e_2^+ &= -2; && \text{the more the better} \\
-18 \leq A_2 \leq -2; &&& \text{For } |A_2 - g_{2,\max}| \\
4 * T_1 + 3 * T_2 + 14 * T_3 + D_3^- - D_3^+ &= A_3; && \text{For economic goal.} \\
A_3 + e_3^- - e_3^+ &= 14; && \text{the more the better} \\
3 \leq A_3 \leq 14; &&& \text{For } |A_3 - g_{3,\max}| \\
-2 * T_1 + 6 * T_2 - 3 * T_3 + D_4^- - D_4^+ &= A_4; && \text{For social goal.} \\
A_4 + e_4^- - e_4^+ &= 6; && \text{the more the better} \\
-2 \leq A_4 \leq 6; &&& \text{For } |A_4 - g_{4,\max}| \\
2 * T_1 + 4 * T_2 + T_3 + D_5^- - D_5^+ &= A_5; && \text{For functional goal.} \\
A_5 + e_5^- - e_5^+ &= 4; && \text{the more the better} \\
1 \leq A_5 \leq 4; &&& \text{For } |A_5 - g_{5,\max}| \\
T_1 + D_6^- - D_6^+ &= A_6; && \text{For urban landscape irrigation goal.} \\
A_6 + e_6^- - e_6^+ &= 120; && \text{the more the better} \\
100 \leq A_6 \leq 120; &&& \text{For } |A_6 - g_{6,\max}| \\
T_2 + D_7^- - D_7^+ &= A_7; && \text{For agricultural demand goal.} \\
A_7 + e_7^- - e_7^+ &= 260; && \text{the more the better} \\
200 \leq A_7 \leq 260; &&& \text{For } |A_7 - g_{7,\max}| \\
T_3 + D_8^- - D_8^+ &= A_8; && \text{For industrial demand goal.} \\
A_8 + e_8^- - e_8^+ &= 150; && \text{the more the better} \\
120 \leq A_8 \leq 150; &&& \text{For } |A_8 - g_{8,\max}|
\end{aligned} \tag{22}$$

Objective functions of AHP-GP formulation: for model 1 to 5

$$\begin{aligned}
\min z &= (W_{E1}/28) * (D_1^- + e_1^-) + && \text{Satisfy environmental goal} \\
&(W_{E2}/2) * (D_2^- + e_2^-) + && \text{Satisfy risk-based goal} \\
&(W_{E3}/14) * (D_3^- + e_3^-) + && \text{Satisfy economic goal} \\
&(W_{E4}/6) * (D_4^- + e_4^-) + && \text{Satisfy social goal} \\
&(W_{E5}/4) * (D_5^+ + e_5^+) + && \text{Satisfy functional goal} \\
&(W_{T1}/120) * (D_6^- + e_6^-) + && \text{Satisfy landscape irrigation goal} \\
&(W_{T2}/260) * (D_7^- + e_7^-) + && \text{Satisfy agricultural irrigation goal} \\
&(W_{T3}/150) * (D_8^- + e_8^-); && \text{Satisfy industrial demand goal}
\end{aligned} \tag{23}$$

Anexo 4

Modelización del Modelo-04

4.4.1 Cost objective.

$$\text{Min } Z^{\text{cost}} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \quad (1)$$

$$Z_1 = \sum_{j=1}^J f_j W_j + \sum_{l=1}^L f_l Y_l \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} d_{ij} dc + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{ikt} d_{ik} dc + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} d_{jk} dc \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{ilt} d_{il} dc + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{jlt} d_{jl} dc + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{klt} d_{kl} dc \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{iot} d_{io} dc \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z_3 = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T Ih_{jt} ch_{jt} \quad (4)$$

$$Z_4 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} cp_{jt} + \sum_{i=1}^I \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{iot} cr_{io} + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{il} cp'_l \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z_5 = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (\lambda_{cit} - \lambda_{it}) wc + \left(\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\alpha_t \lambda_{it} - X_{ilt}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\beta_t Ih_{i(t-1)} - X_{jlt}) \right) \\ & wc + \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\theta_t (X_{ikt} + X_{jkt}) - X_{klt}) \right) wc \end{aligned} \quad (6)$$

4.4.2 Responsiveness objective.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z^{\text{responsiveness}} = & \rho \times \left[\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{ikt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} \right] / \left[\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T d_{kt} \right] \\ & + (1 - \rho) \times \left[\sum_{i=1}^I \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{iot} \right] / \left[\sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T d'_{ot} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

4.4.3 Carbon emission objective.

$$\text{Min } Z^{\text{emission}} = Z^{\text{PE}} + Z^{\text{PH}} + Z^{\text{PR}} + Z^{\text{PT}} + Z^{\text{PD}} \quad (8)$$

$$Z^{\text{PE}} = \sum_{j=1}^J fe_j W_j + \sum_{l=1}^L fe_l Y_l \quad (9)$$

$$Z^{\text{PH}} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Ih_{jt} eh_{jt} \quad (10)$$

$$Z^{\text{PR}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} ep_{jt} + \sum_{i=1}^I \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{iot} ec_i + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \lambda_{il} ep'_l \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Z^{\text{PT}} = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} d_{ij} de + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{ikt} d_{ik} de + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} d_{jk} de + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \\ & \times \sum_{t=1}^T X_{ilt} d_{il} de + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{jlt} d_{jl} de + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{klt} d_{kl} de + \sum_{i=1}^I \sum_{o=1}^O \\ & \times \sum_{t=1}^T X_{iot} d_{io} de \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z^{\text{PD}} = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (\lambda_{cit} - \lambda_{it}) wc + \left(\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\alpha_t \lambda_{it} - X_{ilt}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\beta_t Ih_{i(t-1)} - X_{jlt}) \right) \\ & wc + \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\theta_t (X_{ikt} + X_{jkt}) - X_{klt}) \right) wc \end{aligned}$$

$$\lambda_{it} \times (1 - \alpha_t) = \sum_{j=1}^J X_{ijt} + \sum_{k=1}^K X_{ikt} \quad \forall i \in I, t \in t' \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} \leq M \times W_j \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$\lambda_{it} \leq \lambda c_{it} \quad \forall i \in I, t \in t' \quad (16)$$

$$\theta_{jt(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ijt} = \theta_{jt} + \sum_{k=1}^K X_{jkt} + \sum_{l=1}^L X_{jlt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (17)$$

$$\theta_{jt} \leq \lambda b_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jkt} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} \leq d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{lkt} \leq d'_{ot} \quad \forall o \in O, t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{it} \leq \alpha_t \times \lambda_{it} \quad \forall i \in I, t \in t' \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} \leq M \times Y_i \quad \forall i \in L \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^L X_{ijt} \leq \beta_t \times \theta_{jt(t-1)} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} \leq M \times Y_i \quad \forall i \in L \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^L X_{ikt} \leq \theta_t \times d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{ikt} \leq M \times Y_i \quad \forall i \in L \quad (26)$$

$$\left[\sum_{i=1}^I X_{it} + \sum_{j=1}^J X_{jt} + \sum_{k=1}^K X_{kt} \right] \times \varphi = \sum_{o=1}^O X_{ot} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{o=1}^O X_{ot} \leq \lambda r_l \quad \forall l \in L, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ikt} + \sum_{j=1}^J X_{jkt} \geq \sum_{l=1}^L X_{lkt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (29)$$

$$Y_i, W_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in L, j \in J \quad (30)$$

$$X_{r't} \geq 0 \quad \forall r \in \{I, J, K, L, O\}, r' \in \{I, J, K, L, O\}, t \in T \quad (31)$$

$$\theta_{jt} \geq 0, \lambda_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (32)$$

(1) LP-Metric method

$$\text{Min } w_1 \left(\frac{f_1 - f_1^*}{f_1^*} \right)^P - w_2 \left(\frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} \right)^P + w_3 \left(\frac{f_3 - f_3^*}{f_3^*} \right)^P \text{ S.t Eqs. (14) - (32)} \quad (33)$$

(2) weighted min-max method

$$\text{Min } \gamma \text{ S.t } w_1 \left(\frac{f_1 - f_1^*}{f_1^*} \right) \leq \gamma - w_2 \left(\frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} \right) \leq \gamma + w_3 \left(\frac{f_3 - f_3^*}{f_3^*} \right) \leq \gamma, \text{ Eqs. (14) - (32)} \quad (34)$$

Anexo 5

Modelización del Modelo-05

$$\max En = \sum_{p,t} (qf_{pt}^w + \delta \cdot qf_{pt}^m + \delta' \cdot qf_{pt}^j) - En^{water} \quad (1)$$

$$En^{water} = \sum_{r,t} ew_{rt}^j \cdot wa_{rt}^j + \sum_{p,t} ew_{pt}^w \cdot qf_{pt}^w + \sum_{p,c} ew_{pc}^m \cdot X_{pc}^m \quad (2)$$

$$\min \cos t = TC + \sum_t \frac{1}{(1 + \alpha)^{t-1}} (TR_t + TH_t + TR_t + TT_t + TF_t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} TC &= \sum_{p,c} (CP_{pc}^w \cdot X_{pc}^w + CP_{pc}^m \cdot X_{pc}^m + CP_{pc}^j \cdot X_{pc}^j) + \sum_{i,w,b} CW_{iwb}^w \cdot Y_{iwb}^w + \\ &\quad \sum_{j,r,p,d} CP_{jrp d} \cdot Z_{jrp d} + \sum_r CC_r \cdot f_r + \sum_{w,b} CW_{wb}^j \cdot Y_{wb}^j \end{aligned} \quad (4)$$

$$TR_t = \sum_p (UP_{pt}^w \cdot qf_{pt}^w + UP_{pt}^m \cdot qf_{pt}^m + UP_{pt}^j \cdot qf_{pt}^j) + \sum_{r,w,t} UC_{rt} \cdot q_{rwt}^j \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$TH_t = \sum_{i,w} UH_{iwt}^w \cdot q_{iwt}^w + \sum_w UH_{wt}^j \cdot q_{wt}^j \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$TR_t = \sum_{i,r,w} UR_{irt}^w \cdot q_{iwt}^w + \sum_p (p_{pt}^n \cdot q_{npt} + p_{pt}^p \cdot q_{p_{pt}}) \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} TT_t &= \sum_{i,r,w} UT_{iwt}^w \cdot q_{iwt}^w + \sum_{r,w} UT_{rwt}^j \cdot q_{rwt}^j + \sum_{i,w,p} UT_{iwp t}^w \cdot q_{iwp t}^w + \\ &\quad \sum_{w,p} UT_{wpt}^j \cdot q_{wpt}^j + \sum_{j,r,p} UT_{jrp t}^m \cdot q_{jrp t}^m \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (8)$$

$$TF_t = \kappa_t \cdot TC \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\min Water = \sum_{r,t} wa_{rt}^j + \sum_{p,t} (wa_{pt}^w + wa_{pt}^m) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \min CO_2 &= \sum_r ce^j f_r + \sum_{p,t} ce^m \cdot qf_{pt}^m + \sum_{p,t} ce^w \cdot qf_{pt}^w + \sum_{i,r,w,t} cet_{rw} \cdot q_{iwt}^w + \\ &\quad \sum_{i,w,p,t} cet'_{wt} \cdot q_{iwp t}^w + \sum_{r,w,t} cet_{rw} \cdot q_{rwt}^j + \sum_{w,p,t} cet'_{wt} \cdot q_{wpt}^j \end{aligned} \quad (11)$$

$$\min D \quad (12)$$

S.T.

$$\frac{u_i n_i + v_i p_i}{k_i} \leq D \quad i = 1, \dots, Q \quad (13)$$

$$f_i(x) + n_i - p_i = b_i \quad i = 1, \dots, Q \quad (14)$$

Constraints

$$\sum_w q_{iwt}^w \leq ca_{irt}^w \quad \forall t \in T, r \in R, i \in I$$

$$\sum_p q_{jrp t}^m \leq ca_{jrt}^m \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J$$

$$f_r \leq uf_r \quad \forall r \in R$$

$$\sum_r q_{rwt}^w + qw_{w,t-1}^w \leq \sum_b caw_{w,b}^w \cdot Y_{wb}^w \quad \forall t \in T, w \in W, i \in I$$

$$\sum_r q_{rwt}^j + qw_{w,t-1}^j \leq \sum_b caw_{w,b}^j \cdot Y_{wb}^j \quad \forall t \in T, w \in W$$

$$qw_{wt}^w = 0 \quad \forall t \in T, w \in W, i \neq 1$$

$$\sum_r q_{rwt}^w + qw_{w,t-1}^w = \sum_p qo_{wpt}^w + qw_{wt}^w \quad \forall t \in T, w \in W, i \in I$$

$$\sum_r q_{rwt}^j + qw_{w,t-1}^j = \sum_p qw_{wpt}^j + qw_{wt}^j \quad \forall t \in T, w \in W$$

$$q_{rpt}^m \leq \sum_d cap_{jrpd} \cdot Z_{jrpd} \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J, p \in P$$

$$\sum_i \sum_w qo_{wpt}^w \leq \sum_c cad_{pc} \cdot X_{pc}^w \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$q_{pt}^w \leq \sum_c cap_{pc}^w \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_w qo_{wpt}^j \leq \sum_c cap_{pc}^j \cdot X_{pc}^j \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\omega \sum_w qo_{-1,wpt}^w = \sum_w qo_{wpt}^w \quad \forall t \in T, p \in P, i = 2$$

$$\varpi \sum_w qo_{+1,wpt}^w = \sum_w qo_{wpt}^w \quad \forall t \in T, p \in P, i = 2$$

$$c^{\min} \leq \frac{\sum_{i,w} \delta_{i,c} \cdot qo_{wpt}^w}{Wq_{pt}^w + \sum_{i,w} qo_{wpt}^w} \leq c^{\max} \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\gamma \sum_{i,w} qo_{wpt}^w = q_{pt}^w \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_{j \neq 3,4} \sum_r \sum_d Z_{jrpd} \leq 1 \quad \forall p \in P$$

$$w_{pt}^m = \sum_r q_{1rpt}^m \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_c r_w \cdot s_c \cdot v_{pt} \cdot X_{pc}^m \leq \sum_{j \neq 4} \sum_r q_{jrp}^m \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_c r_n \cdot s_c \cdot v_{pt} \cdot X_{pc}^m \leq (pn \cdot \sum_r q_{3rpt}^m) + q_{npt} \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_c r_p \cdot s_c \cdot v_{pt} \cdot X_{pc}^m \leq (pp \cdot \sum_r q_{3rpt}^m) + q_{ppt} \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_c r_c \cdot s_c \cdot v_{pt} \cdot X_{pc}^m \leq \sum_r q_{4rpt}^m \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\lambda \sum_c s_c \cdot v_{pt} \cdot X_{pc}^m = q_{pt}^m \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_w q_{rwt}^j = \mu_r \cdot f_r \quad \forall t \in T, p \in P, r \in R$$

$$wa_r^j \geq (rf_r - rf_r') f_r \quad \forall t \in T, r \in R$$

$$\phi \sum_w qo_{wpt}^j = q_{pt}^j \quad \forall t \in T, p \in P$$

$$\sum_c X_{pc}^w \leq 1 \quad \forall p \in P$$

$$\sum_b Y_{wb}^w \leq 1 \quad \forall w \in W, i \in I$$

$$\sum_c X_{pc}^m \leq 1 \quad \forall p \in P$$

$$\sum_b Z_{jrp} \leq 1 \quad \forall p \in P, r \in R, j \in J$$

$$\sum_c X_{pc}^j \leq 1 \quad \forall p \in P$$

$$\sum_b Y_{wb}^j \leq 1 \quad \forall w \in W$$

Anexo 6 Modelización del Modelo-06

Modelización del Modelo-06

$$\bar{u}(z) = \frac{u_a}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2}(\rho A u) u^2 = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (2)$$

$$PW = T \int_{u_0}^{u_\infty} P_e(u) f_w(u) du \quad (3)$$

$$POE_i = POE_0 \cdot (1 + e)^i \quad (4)$$

$$\min \sum_{j \in T} cWT(j) \cdot y(j) + \sum_{\ell \in B} cb(\ell) \cdot v(\ell) + \sum_{t=1}^{pb} \sum_{i \in P} \sum_{j \in T} (x(i, j) \cdot c(i, j) \cdot (1 + rr)^{t-1}) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in T} w(j) = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in WT} y(j) \leq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in B} bb(j) \leq 1 \quad (8)$$

$$s(i) \leq \sum_{j \in B} kb(j) \cdot v(j), \quad i \in P \quad (9)$$

$$db(i) \leq s(i), \quad i \in P \quad (10)$$

$$ab(i) \leq \sum_{j \in B} kb(j) \cdot v(j), \quad i \in P \quad (11)$$

$$s(i + 1) = s(i) + ab(i) - db(i), \quad i \in 1 \dots np - 1 \quad (12)$$

$$db(i) + \sum_{j \in T} x(i, j) + \sum_{\ell \in WT} pw(i, \ell) \cdot y(\ell) = d(i) + ab(i), \quad i \in P \quad (13)$$

$$db(i) \leq Mb \cdot z(i), \quad i \in P \quad (14)$$

$$z(i) \leq db(i), \quad i \in P \quad (15)$$

$$ab(i) \leq Mb \cdot zz(i), \quad i \in P \quad (16)$$

$$zz(i) \leq ab(i), \quad i \in P \quad (17)$$

$$z(i) + zz(i) \leq 1, \quad i \in P \quad (18)$$

$$\sum_{i \in P} x(i, j) \leq M \cdot w(j), j \in T \quad (19)$$

$$w(j) \leq \sum_{i \in P} x(i, j), j \in T \quad (20)$$

$$v(j) \leq Mv \cdot bb(j), j \in B \quad (21)$$

$$bb(j) \leq v(j), j \in B \quad (22)$$

$$\sum_{i \in P} zz(i) \cdot pb \leq \text{cycles} \quad (23)$$

$$x(i, j) \geq 0, i \in P, j \in T \quad (24)$$

$$v(i) \in Z, i \in B \quad (25)$$

$$ab(i), db(i), s(i) \geq 0, i \in P \quad (26)$$

$$z(i), zz(i), w(j), y(i), bb(\ell) \in \{0,1\}, j \in T, i \in WT, \ell \in B \quad (27)$$

Anexo 7

Modelización del Modelo-06

Maximize:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J S_j(P_j + X_j) - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K P_{ik} Q_{ik} - \sum_{i=1}^I h_i E_i - \sum_{i=1}^L \sum_{i=1}^I n_{il} F_{il} - \sum_{i=1}^I m_i G_i \\ & - \sum_{j=1}^J y_j P_j - \sum_{j=1}^J (C_j + H_j) Y_j - \sum_{j=1}^J d_j X_j - \sum_{i=1}^I E_i G_i \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^J q_{ij} P_j = \sum_{l=1}^L F_{il} + \sum_{k=1}^K Q_{ik} \quad (1)$$

$$E_i = G_i + \sum_{i=1}^L F_{il} \quad (2)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^J q_{ij} Z_j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^L F_{il} \leq M_2 E_i \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j P_j \leq A \quad (5)$$

$$X_j + Z_j = Y_j \quad (6)$$

$$r_i E_i \leq B_i \quad (7)$$

$$P_j + X_j = D_j \quad (8)$$

$$Y_j \leq N(P_j + X_j) \quad (9)$$

$$Z_j \leq (1 - z) Y_j \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I b_{ik} Q_{ik} \leq T_k \quad (11)$$

$$X_j \leq z Y_j \quad (12)$$

$$s_{il} F_{il} \leq O_{il} \quad (13)$$

$$e_j X_j \leq C_j \quad (14)$$

$$G_i \leq (1 - M_2) E_i \quad (15)$$

$$X_j, Y_j, G_i, E_i, F_{il}, Q_{ik}, Z_j, P_j \geq 0 \quad (16)$$

Anexo 8

Coefficiente de correlación

	Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	Agua limpia y saneamiento	Costo de transporte del contenido de carbono por KM por kilómetro	Emisión de Carbono por unidad de producto	Costo de producción por unidad de producto	Emisiones por unidad de producto	Generación de residuos sólidos	Separación de residuos sólidos	Tratamiento de residuos sólidos	Compostaje de residuos sólidos	Disposición final de residuos sólidos	Volúmen total de escombros en la zona afectada	La cantidad de residuos sólidos	Diferencias de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	Energía equivalente de productos finales	Electricidad producida a partir de residuos	Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	Consumo máximo de energía por periodo	Costo unitario de generar electricidad en el sitio
Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	1	1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	0,547722	0,547225	0,547226	0,547722	0,547722	0,547722
Agua limpia y saneamiento	1	1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	0,547722	0,547225	0,547226	0,547722	0,547722	0,547722

			819																	
			9																	
costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	-	-											0,25	-	-	-	-	-	-	-
Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	0,258	0,258											0,25	0,25	0,47	0,471	0,471	0,47	0,47140	0,47140
Costo de producción por unidad de productos.	1989	199	1	1	1	1	8199	8199	8199	8199	8199	8199	9	8199	1405	4045	405	1405	5	5
Emissiones por unidad de producto	-	-											0,25	-	-	-	-	-	-	-
Generación de residuos sólidos	0,258	0,258	1	1	1	1	8199	8199	8199	8199	8199	8199	9	8199	1405	4045	405	1405	5	5
Separación de residuos sólidos	-	-											0,25	-	-	-	-	-	-	-
	0,258	0,258	1	1	1	1	8199	8199	8199	8199	8199	8199	9	8199	1405	4045	405	1405	5	5
	-0,4	-0,4																		
			0,25	-	-	-														
			819	0,25	0,25	0,25														
			9	8199	8199	8199	1	1	1	1	1	1	1	1	0297	2967	297	0297	7	7
			0,25	-	-	-														
			819	0,25	0,25	0,25														
			9	8199	8199	8199	1	1	1	1	1	1	1	1	0297	2967	297	0297	7	7

electricidad producida a partir de residuos			-											-									
	0,547		0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	-								
	7225	0,547	140	0,47	0,47	0,47	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,29	0,73								
	6	7226	5	1405	1405	1405	0297	0297	0297	0297	0297	0297	0297	7	0297	1	1	1	1	1	1		
Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido			-											-									
	0,547		0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	-								
	7225	0,547	140	0,47	0,47	0,47	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,29	0,73								
	6	7226	5	1405	1405	1405	0297	0297	0297	0297	0297	0297	0297	7	0297	1	1	1	1	1	1		
Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de			-											-									
	0,547		0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	-								
	7225	0,547	140	0,47	0,47	0,47	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,29	0,73								
	6	7226	5	1405	1405	1405	0297	0297	0297	0297	0297	0297	0297	7	0297	1	1	1	1	1	1		
Consumo máximo de energía por periodo			-											-									
	0,547		0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	-								
	7225	0,547	140	0,47	0,47	0,47	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,29	0,73								
	6	7226	5	1405	1405	1405	0297	0297	0297	0297	0297	0297	0297	7	0297	1	1	1	1	1	1		
Costo unitario de generar electricidad en el sitio			-											-									
	0,547		0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	-								
	7225	0,547	140	0,47	0,47	0,47	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,29	0,73								
	6	7226	5	1405	1405	1405	0297	0297	0297	0297	0297	0297	0297	7	0297	1	1	1	1	1	1		