



Universidad Autónoma de Yucatán

Facultad de Ingeniería Química

**Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis
de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras
de biodiesel**

TRABAJO TERMINAL

Presentado por:

LUISA ANDREA GONZÁLEZ CRUZ

En opción al grado de:

**Maestra en Ingeniería de Operaciones
Estratégicas**

Asesor:

Luis Fernando Morales Mendoza

Mérida, Yucatán, México, enero 2020



Universidad Autónoma de Yucatán

Facultad de Ingeniería Química

**Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis
de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras
de biodiesel**

TRABAJO TERMINAL

Presentado por:

LUISA ANDREA GONZÁLEZ CRUZ

En opción al grado de:

**Maestra en Ingeniería de Operaciones
Estratégicas**

Asesor:

Luis Fernando Morales Mendoza

Mérida, Yucatán, México, enero 2020

Mérida, Yuc. a 7 de febrero de 2020.

Dr. Julio Sacramento Rivero

Jefe de la Unidad de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Química.

Presente.

Por este medio informo a Ud. que el Trabajo Terminal denominado “Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras de biodiesel” elaborado por el C. Luisa Andrea González Cruz para obtener el grado de Maestra en Ingeniería de Operaciones Estratégicas, ha sido realizado bajo mi asesoría y dirección, y considero que cumple con las características propias de un trabajo de titulación.

Sin otro particular, quedo a su disposición para cualquier aclaración adicional.

Atentamente

DR. LUIS FERNANDO MORALES MENDOZA

Mérida, Yuc. a 7 de febrero de 2020.

IQI. Roger Agustín Bargas Interián

Secretario Administrativo

Facultad de Ingeniería Química.

Presente.

Por este medio informo a Ud. que el Trabajo Terminal denominado “Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras de biodiesel” elaborado por el C. Luisa Andrea González Cruz para obtener el grado de Maestra en Ingeniería de Operaciones Estratégicas, ha sido revisado y corregido, por lo que considero que cumple con los requisitos necesarios para ser presentado en examen de grado, autorizando su encuadernación. Sin otro particular, quedo a su disposición para cualquier aclaración adicional.

Atentamente

DR. LUIS FERNANDO MORALES MENDOZA

Mérida, Yuc. a 7 de febrero de 2020.

M. en C. María Dalmira Rodríguez Martín

Director de la Facultad de Ingeniería Química.

Presente.

Por este medio le solicito me sea concedido presentar Examen en opción al grado de Maestra en Ingeniería de Operaciones Estratégicas, habiendo entregado para tal efecto la documentación correspondiente en la Secretaría Administrativa, de acuerdo con el artículo 54 del Reglamento de Inscripciones y Exámenes de la UADY y del Manual de Procedimientos de Titulación de esta Facultad.

Atentamente

I.Q. LUISA ANDREA GONZÁLEZ CRUZ

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El presente trabajo denominado “Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras de biodiesel” elaborado por el C. Luisa Andrea González Cruz ha sido autorizado para ser presentado en Examen en opción al Grado de Maestra en Ingeniería de Operaciones Estratégicas

LOS REVISORES

DR. RENÉ LÓPEZ FLORES
PRESIDENTE

M. EN C. PAULINA MARTÍNEZ
ISIDRO

DR. ALBERTO ALFONSO
AGUILAR LASSERRE

EL DIRECTOR

EL AUTOR

DR. LUIS FERNANDO MORALES
MENDOZA

I.Q. LUISA ANDREA
GONZÁLEZ CRUZ

Aunque un trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiere sido aprobado por el Sínodo, sólo su autor es responsable de las doctrinas en él emitidas

Artículo 90 del Reglamento Interior de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán

DEDICATORIAS

A mi madre, por el apoyo incondicional brindado para realizar mis estudios de posgrado en Mérida. Por el constante ánimo que me brindó cuando era necesario, por las palabras de aliento y los abrazos cada vez que era posible reunirnos en mi ciudad natal.

A mi novio, por compartir conmigo esta etapa y las anteriores. Incluyendo las clases, el cansancio, los desvelos, las altas y bajas. Por darme ánimos cuando era necesario, palabras y acciones para reconfortarme en todos los episodios de la maestría.

A mis amigos de la maestría, por hacer de las clases un momento más ameno y compartir también fuera del aula.

A mis amigas y amigos que están a distancia, gracias por leerme o escucharme cuando necesitaba compartir los triunfos y frustraciones de esta etapa.

A mis abuelos, los que ya no están físicamente conmigo pero que sin duda sus enseñanzas se hacen presentes siempre. A mi abuela, que con sus llamadas sigue creyendo en mi potencial y me da ánimos a la distancia.

Finalmente, a esa fuerza intangible que cuando menos lo esperas, llena el corazón y da tranquilidad aún en los peores momentos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada con número de CVU 904765.

Al Dr. Luis Fernando Morales Mendoza, por la asesoría, apoyo, impulso y por creer en mi potencial como estudiante y tutorada.

Al Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística, sede UADY por el apoyo y facilidades brindadas.

Así mismo, al apoyo otorgado para la realización de una estancia de movilidad en el Instituto Mexicano del Transporte, bajo la supervisión y facilidades brindadas por el Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos.

Resumen

El presente trabajo terminal propone una metodología para la toma de decisión a partir del análisis de decisiones multicriterio. Para validarla, se apoya en la aplicación de dicha metodología en dos casos de estudio, enfocados en la producción de biodiésel a partir de dos distintos tipos de insumo: la planta *Jatropha Curcas* y microalgas. A partir de la información recabada en los estudios originales tomados como casos, se distinguen los elementos necesarios asociados a cada etapa de la metodología. La información es evaluada con la aplicación de cuatro técnicas de MCDM: AHP, F-AHP, TOPSIS y M-TOPSIS. Dependiendo del alcance de cada estudio, son definidos escenarios adicionales para comparar los posibles cambios en el ordenamiento de las alternativas, respecto al escenario primordial: el sustentable. El trabajo concluye con la validación de la metodología con ayuda de los casos de estudio, recomendando que para la aplicación de técnicas con mayor grado de subjetividad, aplicar un panel de expertos para la asignación de pesos.

Abstract

Nowadays, a large part of the daily activities is associated with the use of fossil fuels. Therefore, the excessive exploitation and pollution caused by these have led to the search for alternatives that meet the current needs of the population and their related activities. In this context, the aim of this study is the assessment of various biorefinery ecodesign options for the selection of the optimal pathway to produce biodiesel as an alternative to fossil fuels. A methodological framework is proposed, which is based on multicriteria decision-making (MCDM). Several scenarios are suggested to address the three pillars of sustainability and a sensitivity analysis has been carried out. The selected ecodesign alternatives have the top ranks on MCDM techniques applied. The proposed methodological framework serves as a generic and flexible support tool for decision making, with the possibility of expanding the scope of its application.

Palabras claves

Análisis de decisión multicriterio, ecodiseño, biorrefinería.

Multicriteria decision-making, MCDM, ecodesign, biorefinery

CONTENIDO

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Palabras claves.....	ii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vi
CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
CAPÍTULO 2 . ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Marco Conceptual.....	5
2.1.1 Biorrefinería.....	5
2.1.2 Ecodiseño.....	8
2.1.3 Desarrollo Sostenible	9
2.1.4 Análisis de Decisiones Multicriterio	10
2.2 Marco Contextual.....	43
2.2.1 Ecodiseño.....	43
2.2.2 Ecodiseño en las biorrefinerías	45
2.2.3 Análisis de decisiones multicriterio	45
2.2.4 Análisis de decisiones multicriterio en biorrefinerías	47
CAPÍTULO 3 . OBJETIVOS	49
3.1 Justificación con planteamiento del problema.....	49
3.2 Objetivos.....	49
3.2.1 Objetivo General.....	49

3.2.2	Objetivos Particulares.....	49
CAPÍTULO 4 . MATERIALES Y METODOLOGÍA.....		50
4.1	Tipo de investigación	50
4.2	Enfoque cuantitativo-cualitativo (o mixto).....	50
4.3	Diseño.....	50
4.4	Unidad de análisis o sujeto	50
4.5	Diagrama de flujo de la metodología	50
4.6	Metodología	52
CAPÍTULO 5 . RESULTADOS		57
5.1	Caso de estudio 1	57
5.2	Caso de estudio 2	71
5.3	Herramienta de automatización	78
CAPÍTULO 6 . DISCUSIÓN		81
6.1	Caso de estudio 1	81
6.2	Caso de estudio 2	85
CAPÍTULO 7 . CONCLUSIONES.....		88
Referencias.....		89

Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema de los procesos en una biorrefinería.	6
Figura 2.2 Clasificación de las técnicas de MCDM.	12
Figura 2.3. Proceso general de la Toma de Decisión.	13
Figura 2.4. Árbol de jerarquización.	17
Figura 2.5 Función membresía para números difusos.	26
Figura 2.6. Ilustración de la distancia al ideal y anti-ideal.	33
Figura 2.7 Elección de celulares TOPSIS.	43
Figura 4.1 Proceso para el Análisis de Decisiones.	51
Figura 4.2 Procesos del Análisis de Decisiones.....	51
Figura 4.3 Metodología propuesta para la elección del ecodiseño óptimo. Fuente: Elaboración propia	52
Figura 5.1 Localización de alternativas CE1-TOPSIS.....	69
Figura 5.2 Localización de alternativas por escenarios del CE1 en MTOPSIS.....	70
Figura 5.3 Localización de alternativas por escenarios del CE2 en MTOPSIS.....	77
Figura 5.4 Interfaz inicial técnica TOPSIS.....	79
Figura 5.5 Matriz de Decisión para ingreso de valores	79
Figura 5.6 Elección de Max-Min y Ponderaciones	80
Figura 5.7 Resultados y ranking de alternativas	80

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Principios de funcionamiento adoptados en Biorrefinería de su análogo: refinería de aceite crudo.	7
Tabla 2.2 Categorías principales de las técnicas MCDM.	11
Tabla 2.3. Escala de jerarquización de Saaty.	16
Tabla 2.4. Matriz comparaciones pareadas.	18
Tabla 2.5. Valores de Consistencia Aleatoria, para el tamaño de matriz.	20
Tabla 2.6. Límites de consistencia.	20
Tabla 2.7. Matriz de Comparación Principal.	21
Tabla 2.8 Matriz Normalizada.	22
Tabla 2.9. Verificación de Consistencia en ponderaciones.	22
Tabla 2.10. Matriz de Comparaciones: Criterio Precio.	22
Tabla 2.11. Matriz Normalizada Criterio Precio.	23
Tabla 2.12 Verificación de consistencia en las ponderaciones para el Criterio Precio.	23
Tabla 2.13. Matriz de Valorización de Alternativas.	24
Tabla 2.14 Pesos globales para la Selección de Alternativa Óptima	24
Tabla 2.15 Escala de relación números difusos.	26
Tabla 2.16. Matriz comparaciones pareadas.	27
Tabla 2.17. Matriz de Comparación Fuzzificada General.	28
Tabla 2.18. Vector Suma r_i	29
Tabla 2.19 Pesos fuzzificados w_i	29
Tabla 2.20 . Remoción del número triangular difuso.	29
Tabla 2.21. Normalización de los pesos de los criterios.	30

Tabla 2.22. Matriz de Comparación Fuzzificada Criterio Batería.	30
Tabla 2.23. Vectores suma r_i	30
Tabla 2.24 Pesos fuzzificados criterio Batería.	31
Tabla 2.25. Remoción de los números triangulares para los pesos del Criterio Batería.	31
Tabla 2.26. Normalización de los pesos criterio Batería.	31
Tabla 2.27. Matriz Valoración de las Alternativas con criterios.	32
Tabla 2.28 Pesos globales para elección de alternativa.	32
Tabla 2.29. Matriz de decisión TOPSIS.	34
Tabla 2.30. Matriz coeficiente V	34
Tabla 2.31 Matriz Decisión Ejemplo TOPSIS.	36
Tabla 2.32 Matriz de Decisión normalizada TOPSIS.	36
Tabla 2.33 Matriz de Decisión Ponderada.	37
Tabla 2.34 Soluciones ideales positiva y negativa	37
Tabla 2.35 Distancia de alternativas	37
Tabla 2.36 Proximidad relativa	38
Tabla 2.37 Matriz de decisión M-TOPSIS.	38
Tabla 2.38. Matriz coeficiente V	39
Tabla 2.40 Matriz de Decisión.	41
Tabla 2.41 Matriz Normalizada.	41
Tabla 2.42 Matriz de Decisión Ponderada.	41
Tabla 2.43 Solución ideal y no ideal.	42
Tabla 2.44 Distancia Euclidiana.	42
Tabla 2.45 Ranking de alternativas.	42
Tabla 5.1 Descripción de ecodiseños del CE1	59

Tabla 5.2 Matriz Jerarquización Escenario Sostenible CE1, AHP.	60
Tabla 5.3 Matriz Jerarquización Escenario Ambiental CE1, AHP.	61
Tabla 5.4 Matriz Jerarquización Escenario Económico CE1, AHP.	61
Tabla 5.5 Matriz Jerarquización Escenario Social CE1, AHP.	62
Tabla 5.6 Ranking de Evaluación AHP	62
Tabla 5.7 Matriz Jerarquización Escenario Sustentable CE1, F-AHP.....	65
Tabla 5.8 Matriz Jerarquización Escenario Ambiental CE1, F-AHP.....	65
Tabla 5.9 Matriz Jerarquización Escenario Económico CE1 F-AHP.....	66
Tabla 5.10 Matriz Jerarquización Escenario Social CE1, F-AHP.....	67
Tabla 5.11 Ranking de escenarios evaluados F-AHP	67
Tabla 5.12 Matriz Datos -Ponderaciones CE1.	68
Tabla 5.13 Ranking de alternativas CE1- TOPSIS.....	69
Tabla 5.14 Ponderaciones aplicadas en MTOPSIS-CE1.....	70
Tabla 5.15 Ranking de alternativas CE1- MTOPSIS.....	70
Tabla 5.16 Descripción de ecodiseños CE2	72
Tabla 5.17 Matriz Jerarquización Escenario Sustentable- FAHP, CE2.....	73
Tabla 5.18 Matriz Jerarquización Escenario Ambiental - FAHP, CE2.....	73
Tabla 5.19 Matriz Jerarquización Escenario Económico - FAHP, CE2.....	74
Tabla 5.20 Ranking de alternativas - FAHP, CE2	74
Tabla 5.21 Matriz Datos -MTOPSIS, CE2.....	75
Tabla 5.22 Matriz de Ponderaciones -MTOPSIS, CE2.	76
Tabla 5.23 Ranking de alternativas -MTOPSIS, CE2.....	76

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN

Actualmente, la dependencia de los combustibles fósiles para satisfacer las necesidades energéticas a nivel mundial además de su desmesurado consumo ha motivado una búsqueda de alternativas para la generación de energía. Existen diversas alternativas que han sido desarrolladas en los últimos años (Moncada, El-Halwagi, & Cardona, 2013), entre ellas se encuentra la producción de biocombustibles. Los biocombustibles son producidos a partir de materia orgánica o biomasa (Biofuel Org, 2010), que a diferencia de los combustibles fósiles (éstos últimos tardan millones de años en formarse) son una alternativa importante debido a su pronta producción. Además los biocombustibles buscan reducir la dependencia del combustible tradicional (fósil), debido a que tienen el potencial de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (Taylor, 2008) citado en (Adekunle, Orsat, & Raghavan, 2016).

Los procesos de producción de las biorrefinerías son diseñados tomando en cuenta consideraciones tecno-económicas, sociales y ambientales. Integrar estas consideraciones desde las etapas preliminares de diseño de manera sistemática ha sido identificado como una de las mejores alternativas con un impacto a largo plazo sobre el diseño. Esta alternativa es conocida como “Ecodiseño”. El ecodiseño implica generar diferentes diseños del proceso y evaluarlos a través de criterios de las consideraciones antes mencionadas con la finalidad de decidir cuál es el mejor (Morales-Mendoza, Azzaro-Pantel, Belaud, & Ouattara, 2017). Por lo anterior, el ecodiseño puede considerarse un problema multicriterio en el contexto de producir biocombustibles minimizando los impactos ambientales (Producción limpia).

En este trabajo son utilizadas diferentes técnicas del Análisis de Decisión Multicriterio (MCDM) en la metodología diseñada con el fin de validar la selección del ecodiseño óptimo en las biorrefinerías presentadas en los casos de estudio, que buscan producir biodiesel como producto principal a partir de diversas materias primas. El documento está dividido en siete capítulos, el primero, presenta antecedentes de los esfuerzos realizados en la creación y operación de

biorrefinerías; el segundo describe los conceptos más relevantes asociados al tema de investigación, así como las técnicas seleccionadas con una ejemplificación de una situación cotidiana para una mejor comprensión de su funcionamiento. De igual manera, posiciona al lector en el contexto actual de la investigación asociado al ecodiseño, biorrefinerías y análisis multicriterio. El tercer capítulo, da a conocer los motivos que dan pie y justifican la investigación realizada, así como los objetivos planteados en este estudio. El cuarto capítulo describe aspectos puntuales de la investigación llevada a cabo para este trabajo terminal, el diseño de la metodología y la descripción de sus etapas. El quinto capítulo concentra la descripción de los casos de estudio, la aplicación de la metodología y los resultados. La discusión de estos resultados está en el capítulo seis, para cerrar con las conclusiones obtenidas en el capítulo siete.

1.1 Antecedentes

A pesar de la relevancia e importancia de los combustibles fósiles en el desarrollo industrial a nivel mundial, los niveles de los recursos no renovables disminuyen de forma excesiva ocasionando mayores emisiones de contaminantes a la atmósfera, derivando en la búsqueda de bioenergéticos que sean una alternativa a los combustibles tradicionales.

Los bioenergéticos son producidos en biorrefinerías, que son instalaciones de transformación de biomasa, que integran procesos y equipos para obtener una variedad de productos de valor agregado incluyendo combustibles, energía, químicos y productos finales (Fernando, Adhikari, Chandrapal, & Murali, 2006) (citado en Ng & Maravelias, 2016). Éstas se conciben como la base tecnológica de una nueva industria basada en la biomasa (Sacramento-Rivero, Romero, Cortés-Rodríguez, Pech, & Blanco-Rosete, 2010).

En la actualidad existe un enfoque hacia la creación y operación de biorrefinerías para la producción de biocombustibles, a partir de diversos insumos o materias primas con el objetivo de crear productos que funcionen como sustituyentes de los combustibles fósiles. Los biocombustibles son clasificados en cuatro generaciones de acuerdo con la materia prima que utilizan (Moncada B, Aristizábal M, & Cardona

A, 2016). La primera generación contempla combustibles producidos a partir de cultivos cuyo fin original es para alimentación (ejemplo trigo, maíz y canola). En la segunda, la materia prima proviene de cultivos cuyo fin no es la alimentación, residuos de agricultura, forestales e industriales. Los combustibles de la tercera generación provienen a partir de microalgas. Por último, la cuarta tiene como suministro el dióxido de carbono (CO₂) y plantas como la karanja, *Jatropha Curcas* y ricino.

Actualmente operan 10 biorrefinerías a nivel mundial, de las cuales nueve producen bioetanol y una más bioplásticos. En Brasil y Estados Unidos, la sustitución de gasolina por el combustible renovable es paulatino. En el 2016 la Universidad Autónoma de Sinaloa en conjunto con la empresa Intrust Global Investments y la Universidad de Harvard, proponían mediante un proyecto la creación de la primera biorrefinería del país para la producción de diversos biocombustibles y derivados, tales como biodiesel, bioetanol, bioturbocina, glicerina, quitina y quitosano. Los principales insumos tendrían origen en la agricultura y acuicultura, la materia prima inicial sería el arbusto conocido como piñón o *Jatropha Curcas* (Aldecoa, 2016). Recientemente en el Instituto de Ecología (INECOL), un multinacional equipo científico ha puesto en marcha una biorrefinería de cuarta generación, que produce biocombustibles a partir de microalgas empleando agua tratada proveniente de un río contaminado. El diseño incluye plantas acuáticas y especies nativas de microalgas, produciendo biogás e hidrógeno (AgencialD, 2018). Los esfuerzos realizados para contrarrestar la creciente contaminación ambiental, representan un cambio de pensamiento en el que se ven involucrados aspectos económicos, ambientales, sociales y políticos, por ende es necesaria la participación de diversas disciplinas que estudien tales sectores (Báez, 2017). Un concepto que hace énfasis en la inclusión de dichos aspectos es el ecodiseño, que bien puede ser aplicado en el desarrollo de bioenergéticos. El término fomenta en éste ámbito, el empleo eficiente de combustibles de origen renovable y la reducción de emisiones de efecto invernadero (REMICA, 2018). Así mismo tiene otras aplicaciones en productos, empaques y etiquetas. Algunas estrategias en la aplicación del ecodiseño son el mejoramiento del concepto del producto, la selección de materiales de bajo impacto,

la reducción del uso de materiales y optimización de técnicas de producción (Verdejo-Andrés, 2010) .

Como ha sido mencionado anteriormente, el interés para encontrar alternativas ecológicas que sustituyan a su contraparte fósil ha crecido en los últimos años. Por esta razón, recientemente algunos estudios se han enfocado en el diseño de biorrefinerías productoras de biodiesel a partir de diversas materias primas, tales como la *Jatropha Curcas* y las microalgas. Estas investigaciones apoyan en la solución de los problemas mencionados, motivo por el cual han sido elegidas específicamente como casos de estudio para la aplicación de una metodología con fundamento en el análisis de decisiones multicriterio (MCDM). A pesar de la conclusión satisfactoria de los estudios, su elección está relacionada en la investigación y desarrollo de soluciones con tendencia en alternativas de energía renovables y el ecodiseño óptimo implicado en la configuración de procesos de conversión según el caso. A partir de ello, el objetivo general buscado en este trabajo es la validación de la metodología diseñada con ayuda de los casos de estudio, para servir como herramienta que sustente la decisión del investigador de modo tal que facilite el proceso de toma de decisión

CAPÍTULO 2 . ESTADO DEL ARTE

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Biorrefinería

Según Fernando et al., (2006), biorrefinería (BR) se define como una instalación que integra procesos de conversión y equipos para producir combustibles, energía y químicos a partir de la biomasa. También como el proceso sostenible de conversión de biomasa en un espectro de productos comerciales y de energía (Ree & Zeeland, 2014). Existe una variedad de biomasa proveniente de la agricultura y silvicultura, de procesos y productos. Esto deriva en distintas combinaciones de biomasa-proceso-producto, para las alternativas de diseño de la biorrefinería (Sanaei, 2014). Actualmente, la tecnología se basa en (a) el uso completo de la planta o complejo biomásico, y (b) la integración de procesos modernos y tradicionales para el uso de la materia prima (Demirbas, 2009). Idealmente, una biorrefinería a gran escala, altamente eficiente e integrada debe permitir la manufactura de bioproductos. Estos deben ser completamente competitivos con sus equivalentes convencionales (Aresta et al., 2015). Además de poseer alto valor tanto en productos como coproductos. También, podrán presentar opciones más económicas donde los bioquímicos son coproductos del combustible líquido (Demirbas, 2009).

Entre las condicionantes más importantes para el éxito de una biorrefinería se encuentran los bajos costos de operación y sostenibilidad. La producción sostenible a través de todo el ciclo de vida del producto es una condición necesaria para la aceptación pública (Aresta et al., 2015), donde los productos dejan una pequeña huella de carbón y poseen mejores o iguales propiedades a su equivalente fósil con precio competitivo. La Figura 2.1 muestra los procesos de una biorrefinería:

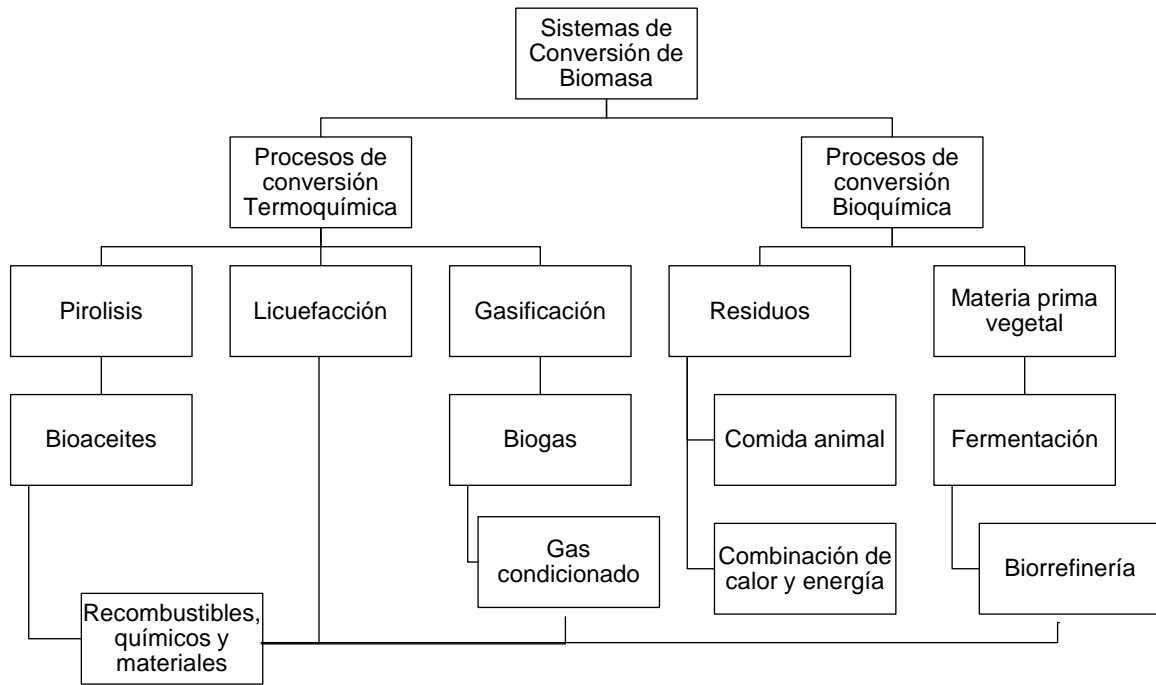


Figura 2.1 Esquema de los procesos en una biorrefinería.

Fuente: (Demirbas, 2009).

El tópico de biorrefinería se conoce cada vez más debido a la tendencia ambiental que ayuda en la solución de los problemas generados por el excesivo uso de los combustibles fósiles. La Tabla 2.1 muestra los puntos más importantes para el funcionamiento de la refinería moderna, que fueron considerados y adaptados en el concepto de biorrefinerías (Sadhukhan, Siew Ng, & Martinez-Hernandez, 2014).

Tabla 2.1 Principios de funcionamiento adoptados en Biorrefinería de su análogo: refinería de aceite crudo.

Fuente: (Sadhukhan et al., 2014)

REFINERÍA	BIORREFINERÍA
Procesos de tecnología maduros (perforación catalítica y térmica, hidrot ratamiento)	Procesos de tecnología maduros e innovadores (gasificación de la biomasa, pirolisis, fermentación, digestión anaerobia, bio-separaciones, hidro perforación)
Uso de cada fracción de aceite crudo	Uso de cada fracción biomásico y sus componentes
Flexibilidad del proceso y diversificación del producto	Flexibilidad del proceso y diversificación del producto
Coproducción de valiosos bloques químicos de construcción	Coproducción de valiosos bloques químicos de construcción y de alta función
Cogeneración de calor y poder	Cogeneración de calor y poder
Integración del proceso	Integración y diseño del proceso para la sustentabilidad
Economía a escala	Escala acorde a la logística de la biomasa, debe ser maximizada para beneficiarse

Según (Sadhukhan et al., 2014), identifica tres tipos de biorrefinerías de acuerdo con las fases de desarrollo y complejidad:

1. Materia prima única, proceso fijo y no diversificación de productos. Ejemplos como molindas en seco de maíz y trigo para plantas de bioetanol, plantas de biodiesel usando aceites vegetales. Las cuales no tienen flexibilidad en los procesos y producen cantidades fijas de combustibles y coproductos.
2. Materia prima única, procesos flexibles y múltiples con diversificación de productos. Tal como la molienda húmeda de maíz y varios procesos con la capacidad de adaptar múltiples producciones dependiendo de la demanda de producto y precios de mercado.

3. Procesos múltiples e integrados que permiten la conversión de diversas materias primas de distinta naturaleza o la misma, a un diverso portafolio de productos. Las biorrefinerías flexibles podrán permitir cambios entre materia prima y mezcla de materias primas para la conversión en productos.

El funcionamiento y operación de las biorrefinerías presenta muchos desafíos a lo largo de la cadena de valor, desde el cultivo de materia prima, cosecha y pretratamiento; la logística, técnicas de separación y optimización de procesos hasta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la sustentabilidad. Por lo tanto, es importante la integración multidisciplinaria en las biorrefinerías para entender la complejidad e identificar las necesidades (Aresta et al., 2015). Una aplicación de la integración multidisciplinaria está inmersa en el concepto de ecodiseño.

2.1.2 Ecodiseño

De acuerdo con Morales-Mendoza et al., (2017), el ecodiseño es la integración de consideraciones ecológicas con criterios de impacto ambiental durante la etapa preliminar del proceso sistemático de diseño, además es una alternativa con un mayor impacto en el diseño. También este concepto hace referencia a considerar al Medio Ambiente en la toma de decisiones durante el proceso de desarrollo de productos, como un factor adicional (Lurralde, Etxebizita, & Ingurugiro, 2000). Así como trasladar el factor adicional a un proyecto mayor enfocado al ambiente (Turra, 2002). A su vez, tiene como objetivo reducir el impacto ambiental de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, por lo cual es una técnica muy relacionada con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Aranda-Usón & Zabalza-Bribián, 2010). (Merschak & Hehenberger, 2019), consideran que la huella de carbono dentro del ecodiseño es un factor muy importante, por lo tanto en una temprana evaluación del producto (respecto a este factor) es beneficioso puesto que en esta etapa de ecodiseño aún es posible realizar cambios con menor esfuerzo. De acuerdo con Santos (2001), necesita tener una visión holística desde el reconocimiento de los problemas ambientales y sus causas, que tienen influencia en la concepción, selección de materiales, producción, uso y reúso hasta la disposición final. Recientemente, este concepto está convirtiéndose en un aliado fundamental para la innovación

tecnológica enfocado a la responsabilidad ambiental. Considerado como garantía vital para el desarrollo de la sustentabilidad y la reducción de impactos ambientales en productos nuevos (Platcheck, Schaeffer, Kindlein, & Cándido, 2008). También se ha convertido en un tema importante en la ética, economía, administración y otros campos (Kaplan, 2017). Asimismo, se ha visto inmerso en el aseguramiento y funcionalidad de herramientas donde ha sido aplicado el ecodiseño (Zahálka, Bradáč, Tůma, & Synek, 2014)

Además, recientemente se considera un modo de pensar y analizar, aplicado a los métodos y en sus diferentes fases (Knight & Jenkins, 2009). Respecto a ello, (Rousseau, 2019) ilustra el enfoque del ecodiseño con el propósito de ofrecer productos con alto valor agregado, basados en la optimización de energía, reducción de emisiones gaseosas y desechos, el uso de tecnologías y materiales con bajo impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del producto al cual sea aplicado.

En gran medida, el ecodiseño busca estimular cambios en la industria y crear conciencia del impacto ambiental que generan todas las actividades y productos usados día con día. De acuerdo con (Denac, Obrecht, & Radonjič, 2018) la implementación más alta del ecodiseño se observa en la fase “diseño para el uso” de productos, donde los criterios empleado son maximizar el tiempo de vida del producto, reúso, reciclaje y desarme.

De acuerdo con (Obrecht, 2019), el ecodiseño y el desarrollo sostenible no solo se convertirán en una parte de la ventaja comparativa para la diferenciación estratégica sino que será una potencial respuesta a los desafíos previstos en las próximas décadas.

2.1.3 Desarrollo Sostenible

“El desarrollo sostenible se ha definido como el desarrollo capaz de satisfacer las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (Naciones Unidas, 2015). Este se encuentra fundamentado en tres pilares o dimensiones: económica, ambiental, y humana (Alfaro-Barbosa, Limón-Rodríguez, & Martínez-Turanzas,

2014). El pilar ambiental comprende el cuidado, protección y restauración del ambiente. Además, es importante garantizar una gestión responsable de los recursos naturales (Fernández-García, 2011). El segundo pilar pretende impulsar el crecimiento. Esto es generaciones más ricas, mayor renta per cápita y calidad de vida. El pilar social, procura la satisfacción de necesidades básicas humanas fundamentales: salud, mejoras en la educación, participación igualitaria de mujeres y grupos minoritarios (Rivarola, 2012). Dentro de este último, se busca la adopción de estrategias tecnológicas no destructivas, cambiando a tecnologías más eficientes, limpias y apropiadas. También a la implementación de alternativas al conjunto de técnicas ya conocidas. Estos deben ser aplicados también a los procesos establecidos en las diversas industrias (Alfaro-Barbosa et al., 2014).

La preocupación por el medio ambiente y el desarrollo se inició desde la década de 1970, al cuestionarse la viabilidad del crecimiento como un objeto global (Alfaro-Barbosa et al., 2014). La Agenda 2030 se aprobó en septiembre 2015, durante la Cumbre del Desarrollo Sostenible. Ella contiene 17 objetivos de aplicación universal, con el fin de conjuntar esfuerzos para un mundo sostenible en 2030 (Naciones Unidas, 2015). Los objetivos buscan la participación de los países, sin importar recursos económicos, en promover la prosperidad y protección del planeta. Cada nación asumirá y cumplirá la ejecución de éstos, apoyando las estrategias mediante financiación y movilización de recursos. El campo de aplicación es distinto de un país a otro.

2.1.4 Análisis de Decisiones Multicriterio

La toma de decisión es un proceso donde las alternativas son evaluadas para seleccionar una opción que cumpla con los objetivos deseados y las metas. El análisis de decisiones multicriterio (MCDM) es el proceso de seleccionar un curso de acción entre dos o más alternativas disponibles (Hwang & Masud, 2012). Además, es un procedimiento lógico para determinar y valorar los factores que afectan la decisión (Ley, 2002). A su vez, es una disciplina para evaluar alternativas complejas en términos de valor e incertidumbre (Bacon, 2015), generando impacto

en la organización donde sea empleado y recientemente se ha convertido en una herramienta crítica para las organizaciones (Akdere, 2011).

El MCDM es un sector de la investigación de operaciones que buscan seleccionar la alternativa óptima en relación a un objetivo, respondiendo a un conjunto múltiple de criterios que a menudo están en conflicto (Ishizaka & Siraj, 2018). (Gal, 1980) citado en (Sabaei, Erkoyuncu, & Roy, 2015) divide en dos categorías principales las técnicas de MCDM (ver Tabla 2.2).

- Análisis de decisiones multiatributo (MADM)
- Análisis de decisiones multiobjetivo (MODM)

Tabla 2.2 Categorías principales de las técnicas MCDM.

Fuente: (Sabaei et al., 2015)

	MADM	MODM
Criterios	Atributos	Objetivos
Meta	Claros	No claros
Atributos	Claros	No claros
Limitaciones	No claros	Claros
Opciones	Finitas	Infinitas
Interacción con el decisor	Baja	Alta

Con relación a la división de las principales técnicas de MCDM, (Aruldoss, 2013) propone una división (ver Figura 2.2) a partir de la información proveniente de (Jahan, Ismail, Sapuan, & Mustapha, 2010), que es reforzada por (Mardani, Jusoh, & Zavadskas, 2015).

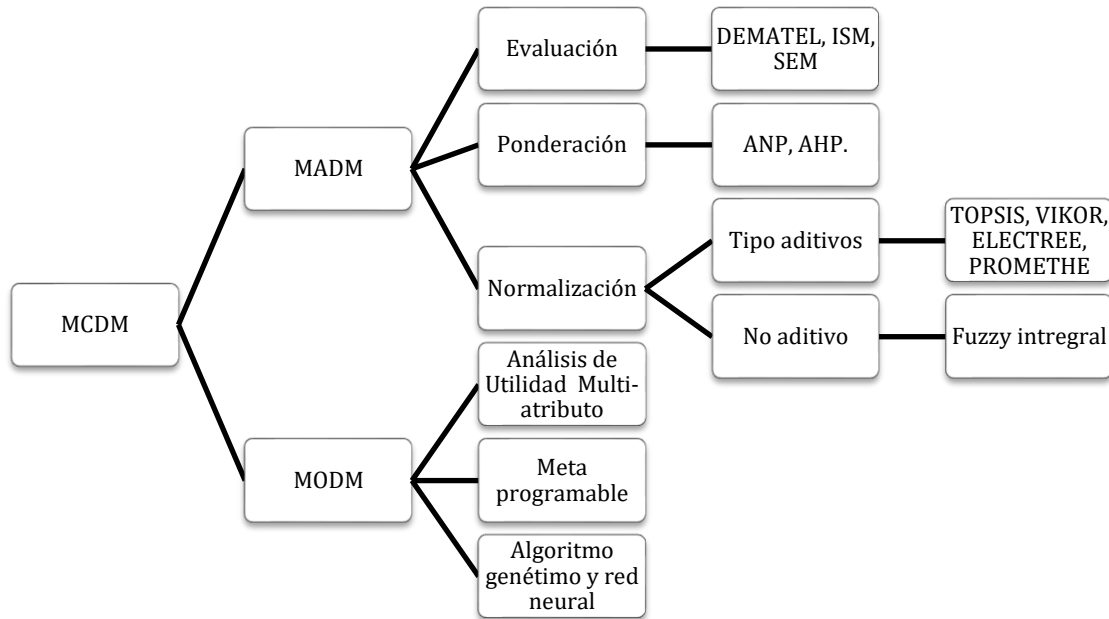


Figura 2.2 Clasificación de las técnicas de MCDM.

Fuente: (Mardani et al., 2015).

Las principales etapas de la toma de decisión de acuerdo con (Karen, 2015) son:

- Identificación del problema
- Determinar los criterios de decisión y asignación de ponderaciones
- Desarrollar las alternativas
- Evaluar las alternativas
- Elegir una opción

El objetivo del análisis de decisión es que, al cierre de este proceso, el decisor sepa lo que desea, la naturaleza de la situación enfrentada y los efectos de las acciones que tomará. Los elementos importantes son las preferencias, las alternativas y los eventos inciertos. Las preferencias son de orden interno y personal, indican el valor que se asignaría a cada resultado. Las segundas son elecciones en las cuales se posee el control. Por último, los eventos inciertos son aquellos donde se carece de control (Ley, 2002).

Autores tales como (Bushan & Rai, 2004) y Baker et al., (2002) desarrollan el proceso de la toma de decisión de forma más detallada (ver Figura 2.3). De acuerdo con (Sabaei et al., 2015) para lograr la meta junto con los objetivos, el primer paso

es elegir la técnica apropiada que se adapte mejor al tipo de problema. Como segundo paso, los requerimientos para la decisión deben ser definidos por un grupo de expertos, continuando con definir de manera clara la meta como tercer paso, identificando las alternativas que generarán el cambio de la condición inicial a aquella preferida o buscada. Sin embargo, es frecuente que ninguna cumpla con los requerimientos, por lo tanto, la elección será basada en aquella que se acerque más al objetivo deseado.

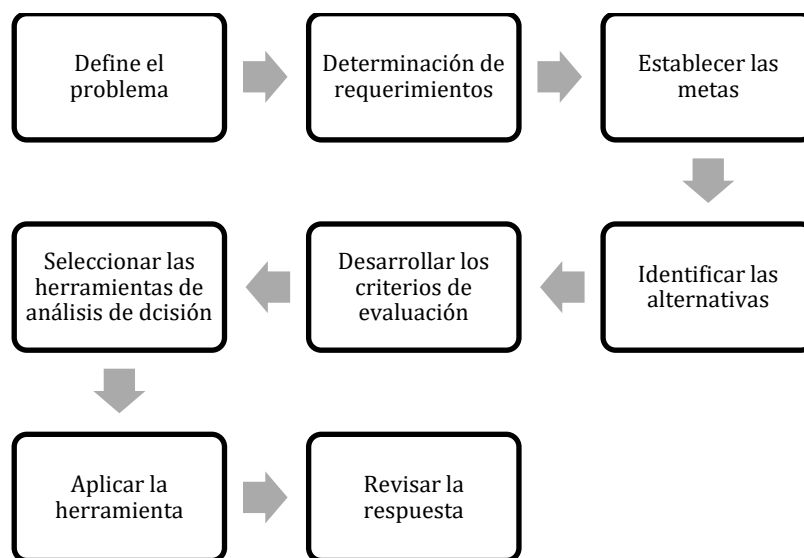


Figura 2.3. Proceso general de la Toma de Decisión.

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, la complejidad en la cantidad y calidad de la información a la cual se tiene acceso hacen necesario el empleo de un marco de referencia para la toma de decisiones (Bacon, 2015). Existen diversas herramientas dentro del análisis de decisiones, entre ellas está el Análisis de Decisión Multicriterio, que estructura y resuelve problemas de decisión complejos con múltiples criterios (Majumder, 2015). Recientemente ha ganado importancia, debido a su capacidad de análisis en problemas complicados, con la ventaja de juzgar diferentes alternativas (Mohindru, 2011). El principio básico de trabajo en las técnicas de Análisis de Decisión Multicriterio es semejante: Selección de criterios, Selección del alternativas, Selección de Métodos de Agregación y finalmente Selección de la “mejor” alternativa basado en pesos o superación de rangos (Majumder, 2015).

Un punto clave en el análisis multicriterio es la complejidad de las diferentes perspectivas, valores y preferencias de aquellos responsables por las decisiones tomadas, así como de los impactos (Marttunen, Lienert, & Belton, 2017). Estructurar un problema de forma efectiva es muy importante para el análisis multicriterio ya que las fases subsecuentes de este, son influenciadas fuertemente por el proceso seguido en cada técnica (Belton & Stewart, 2010). Baker et al., (2002) sugiere que los criterios definidos deben cumplir con algunas características, tales como:

- Distinguirlos dentro de las alternativas
- Permitan llegar a la meta
- No redundantes
- Poco numerosos
- Operacionales y con significado

Existen diversas técnicas de análisis de decisiones multicriterio y de acuerdo con (Cinelli et al., 2014) no existen razones específicas para elegir una técnica sobre otra. Sin embargo, debido a la frecuencia de uso, familiaridad y afinidad se describen las siguientes técnicas.

2.1.4.1 Técnica AHP

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) fue elaborado por Thomas Saaty, la técnica está basada en la solución de un problema complejo de criterio múltiple mediante la jerarquización de los problemas planteados. La comparación por pares es la característica principal, tanto para comparar alternativas contra criterios, como la asignación de pesos en criterios (Saaty, 1980) citado en (Ioannou, Konstantinos; Lefakis & Arabatzi, 2011). La asignación de pesos a los criterios es llevada a cabo por el analista o decisor que ejecuta los pasos de la técnica. La facilidad de uso es una ventaja además de ajustar el tamaño por su estructura jerárquica. Requiere de la información necesaria para realizar las comparaciones, pero a diferencia de otras técnicas, no precisa de información intensiva (Velasquez & Hester, 2013). La jerarquía permite descomponer el problema en elementos individuales, de donde la relación entre estos puede ser analizada. Una desventaja es la reversión de categorización, presentada al agregar alternativas al final del proceso, que en

consecuencia invierte las clasificaciones finales (Díaz-Balteiro, González-Pachón, & Romero, 2017).

Acorde a (San Cristóbal Mateo, 2012) , los pasos y el procedimiento de cada uno de estos en la técnica AHP para la toma de decisiones son:

1. Definir el problema, generar alternativas y establecer criterios.

El decisor define de manera clara el problema, distinguir las alternativas, identificar los objetivos y establecer los criterios clave.

2. Asignación de peso a criterios

Los pesos de cada criterio muestran la importancia individual en el problema. Es importante que sean asignados de acuerdo con la multiplicidad de factores.

3. Construcción de la matriz de evaluación.

La matriz muestra la complejidad del problema de forma gráfica. El acomodo de los valores depende del criterio y peso asignado, así como el número de alternativas.

4. Categorizar las alternativas.

Las alternativas son categorizadas y aquella con mejor nivel se propone como la mejor alternativa.

Según (Quaddus, Abu, & Siddique, 2011) existen cuatro etapas principales en la aplicación de la técnica AHP:

1. Modelización
2. Valoraciones
3. Priorización y síntesis
4. Análisis de consistencia

1. *Modelización*

En esta etapa, se realiza la jerarquización del problema, la organización de ideas y definición de objetivo(s), los criterios a emplear y alternativas del objeto de estudio.

El punto de partida es la definición del objetivo del proceso según el decisor, continuando con las diferentes alternativas de las cuales buscamos la mejor opción que cumpla con el objetivo previamente planteado. Después son determinados los criterios que serán valorados, los cuales deben representar al problema de la forma más completa posible identificando los atributos que apoyan en la solución. Estos criterios deben ser medibles numéricamente, así como subjetivamente, usando la escala de comparación propuesta por el autor de la técnica (ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Escala de jerarquización de Saaty.

VALOR	DEFINICIÓN
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia grande
7	Importancia muy grande
9	Importancia extrema
2,4,6,8	Valores intermedios para matizar

Para una mejor comprensión, la modelización está ejemplificada mediante un árbol de jerarquización (ver Figura 2.4). En el primer nivel se encuentra el objetivo del problema, seguido por los criterios que pueden desglosarse en subcriterios que valoran las alternativas finalizando con el tercer nivel donde están las posibles soluciones del objetivo.

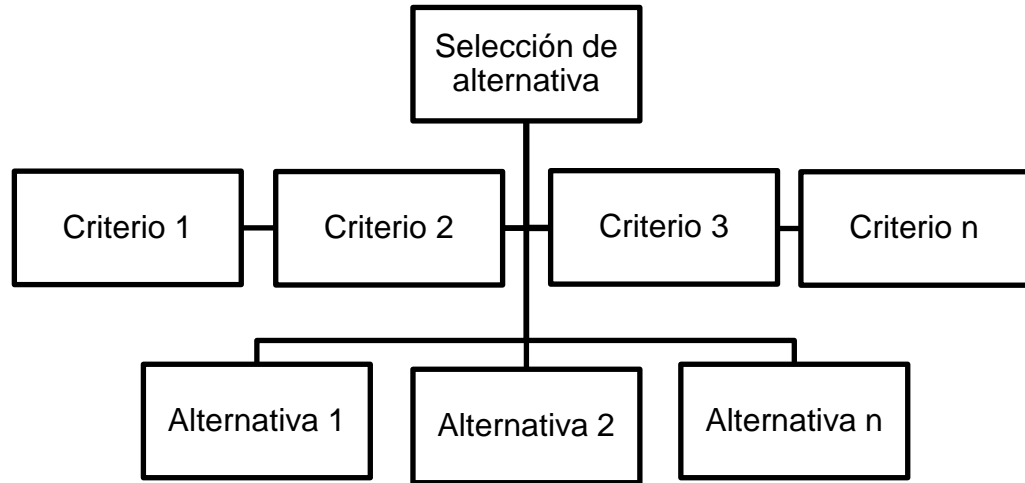


Figura 2.4. Árbol de jerarquización.

2. Valoraciones

Con las alternativas y criterios definidos, el siguiente paso es el ordenamiento y ponderación de cada criterio. El decisor asigna la importancia a cada uno, mediante la escala mencionada previamente (ver Tabla 2.3). El procedimiento consiste en comparar cada criterio i , consigo mismo y los demás. Obteniendo comparaciones pareadas, formando una matriz cuadrada. Se considera necesario:

- **Reciprocidad:** con la matriz de comparaciones pareadas se cumple que $A_{ij} = x$, entonces $A_{ji} = 1/x$, considerando $1 \leq x \leq 9$.
- **Homogeneidad:** los elementos deben ser de mismo orden de magnitud y jerarquía.
- **Independencia:** los criterios no tienen dependencia con las propiedades de las alternativas.

La matriz de comparaciones pareadas resulta de la siguiente forma (ver Tabla 2.16):

Tabla 2.4. Matriz comparaciones pareadas.

	A1	A2	A3
A1	1	a_{12}	a_{13}
A2	a_{21}	1	a_{23}
A3	a_{31}	a_{32}	1

3. *Priorización y síntesis*

El siguiente paso es la prioridad, la cual indica la importancia que el decisor asigna a cada elemento de la matriz pareada. Se expresan en forma de vectores, llamados auto vectores propios de A ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$). Cuando el vector propio obtenido sea de la matriz de criterios, será V_c que indica la importancia relativa de cada uno de los criterios seleccionados en la valoración para el conjunto de alternativas. Cuando el vector propio sea de la matriz de alternativas para un criterio determinado, será V_{ai} (vector columna) que indica el peso relativo de cada alternativa para el criterio i. Se obtienen tantos vectores propios como criterios. Una consideración importante es que el decisor realiza un juicio personal. Puede llevar a una inconsistencia, que es evaluada para encontrarse dentro de los límites permitidos, como se explica en el siguiente contenido.

4. *Análisis de consistencia*

La subjetividad se intenta hacer objetiva dentro del máximo alcance, puesto que los elementos de la matriz original se comparan sucesivas veces para formar las diversas matrices necesarias. El grado de consistencia se mide con el Ratio de Inconsistencia (CR, Consistency Ratio por sus siglas en inglés). Si éste es aceptable, continúa el proceso de decisión. De lo contrario, deberán modificarse los juicios en las comparaciones pareadas antes de seguir. Se calcula como:

1. La matriz A es normalizada: partiendo de la matriz cuadrada original, se obtiene la sumatoria de cada columna. Cada elemento se divide entre su

respectivo total de columna para generar la matriz de comparaciones pareadas.

$$A_{normalizada} = \left[\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

2. Se suman las filas para crear los vectores fila de la matriz normalizada pareada:

$$\frac{a_{n1}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{n2}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \frac{a_{nn}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} = b_n \quad \text{Ecuación 2}$$

3. Formación de un vector de prioridades B.

$$B = \left[\frac{b_1}{n}, \frac{b_2}{n}, \dots, \frac{b_n}{n} \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

4. El producto de la matriz original A por el vector de prioridades B, forma una matriz columna C:

$$A * B = C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad \text{Ecuación 4}$$

5. Se realiza el cociente entre la matriz columna C, y el vector de prioridades B. Se obtiene otro vector columna D:

$$\frac{C}{B} = D \quad \text{Ecuación 5}$$

6. Al sumar sus elementos, y promediarlos se obtiene el valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$, que permite conocer el Índice de consistencia.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 7}$$

7. Este CI obtenido, debe compararse con el CI aleatorio establecido (ver Tabla 2.5). Este representa el valor de CI, obtenido a partir de los juicios numéricos de la escala de Saaty introducidos de manera aleatoria en la matriz de comparaciones:

Tabla 2.5. Valores de Consistencia Aleatoria, para el tamaño de matriz.

TAMAÑO DE LA MATRIZ (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CONSISTENCIA ALEATORIA	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

8. Se divide el CI obtenido entre la consistencia aleatoria, para obtener el Radio de consistencia:

$$CR = \frac{CI}{Consistencia\ aleatoria} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para considerar la matriz como consistente, se establece una tabla de valores de acuerdo con el tamaño de la matriz (ver Tabla 2.6):

Tabla 2.6. Límites de consistencia.

TAMAÑO DE LA MATRIZ (N)	RATIO DE CONSISTENCIA
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

El CR obtenido es comparado con el correspondiente de acuerdo con la técnica (ver Tabla 2.6), si coincide es posible continuar con la evaluación de más matrices o analizar los valores para hallar la inconsistencia. De acuerdo con los niveles que cuente el árbol jerárquico, se crean las matrices necesarias. Al tener el conjunto de

éstas, continúa con la compilación de información importante de cada una. Esto es, los vectores de prioridad B, para cada criterio utilizado. Posteriormente, se para la categoría principal con el peso (vector prioridad B) de cada criterio, para obtener el porcentaje correspondiente a la alternativa, para finalmente seleccionar la mejor.

Aplicación de la técnica AHP

Para representar el proceso de la técnica, se desarrolla en la elección de un celular. Las alternativas son tres: iPhone X®, Samsung 9® y HTC®. Los criterios elegidos como principales para determinar el equipo óptimo para el decisor son Precio, Batería, Memoria y Cámara. Se muestra la primera matriz (ver Tabla 2.7) donde los criterios son ponderados de acuerdo con la preferencia del decisor.

Tabla 2.7. Matriz de Comparación Principal.

CRITERIOS	Precio	Batería	Memoria	Cámara
Precio	1.00	4.00	2.00	3.00
Batería	0.25	1.00	0.20	0.20
Memoria	0.50	5.00	1.00	2.00
Cámara	0.33	5.00	0.50	1.00

Después, los valores obtenidos son normalizados, generando un vector columna que será eje para la ponderación global de las alternativas (ver Tabla 2.8). Al finalizar el proceso, es necesario verificar la consistencia de las ponderaciones hechas, por lo que, con los índices de consistencia, consistencia aleatoria y el radio de consistencia, es posible repetir el proceso para cada uno de los criterios. A partir de los resultados, el radio de consistencia es igual en este caso a 0.08 (ver Tabla 2.9), en consecuencia, comienza el proceso para el criterio Precio.

Tabla 2.8 Matriz Normalizada.

CRITERIOS	Precio	Batería	Memoria	Cámara	VECTOR COLUMNA
Precio	0.48	0.27	0.54	0.48	0.4428
Batería	0.12	0.07	0.05	0.03	0.0682
Memoria	0.24	0.33	0.27	0.32	0.2915
Cámara	0.16	0.33	0.14	0.16	0.1974
					1.00

Tabla 2.9. Verificación de Consistencia en ponderaciones.

CONSISTENCIA	
Datos	4
λ_{máx}	4.206
IC	0.069
IAC	0.89
RC	0.08

Tal como se realizó anteriormente, se evalúa el criterio Precio con cada una de las alternativas propuestas (ver Tabla 2.10). El proceso es repetitivo en la normalización (ver

Tabla 2.11) así como la verificación de la consistencia en las ponderaciones (ver Tabla 2.12).

Tabla 2.10. Matriz de Comparaciones: Criterio Precio.

ALTERNATIVAS	IPhone X	Samsung S9	HTC
IPhone X	1.00	0.33	0.14
Samsung S9	3.00	1.00	0.33
HTC	7.00	3.00	1.00
SUM	11.0000	4.3333	1.4762

Tabla 2.11. Matriz Normalizada Criterio Precio.

ALTERNATIVAS	IPhone X	Samsung S9	HTC	VECTOR COLUMNA
IPhone X	0.0909	0.0769	0.0968	0.0882
Samsung S9	0.2727	0.2308	0.2258	0.2431
HTC	0.6364	0.6923	0.6774	0.6687
				1.00

Tabla 2.12 Verificación de consistencia en las ponderaciones para el Criterio Precio.

CONSISTENCIA	
Datos	3
$\lambda_{\text{máx}}$	3.007030383
CI	0.003515192
IAC	0.52
CR	0.01

El concentrado de las evaluaciones de los criterios seleccionados, así como las alternativas para la elección del equipo son mostrados (ver

Tabla 2.13). Los valores del Vector Columna son multiplicados de forma individual

CRITERIOS	Precio	Batería	Memoria	Cámara
VECTOR COLUMNA	0.4428	0.0682	0.2915	0.1974
ALTERNATIVAS				
IPhone X	0.0882	0.1062	0.0982	0.1062
Samsung S9	0.2431	0.6333	0.3339	0.2605
HTC	0.6687	0.2605	0.5679	0.6333

con cada una de las cifras de las alternativas, obteniendo el resultado global (ver

Tabla 2.14). De ésta última, se concluye que la alternativa con mayor puntaje es la elegida, en este caso el equipo HTC.

Tabla 2.13. Matriz de Valorización de Alternativas.

CRITERIOS		Precio	Batería	Memoria	Cámara
VECTOR COLUMNA		0.4428	0.0682	0.2915	0.1974
ALTERNATIVAS	IPhone X	0.0882	0.1062	0.0982	0.1062
	Samsung S9	0.2431	0.6333	0.3339	0.2605
	HTC	0.6687	0.2605	0.5679	0.6333

Tabla 2.14 Pesos globales para la Selección de Alternativa Óptima

PESOS GLOBALES		
ALTERNATIVAS	IPhone X	0.0959
	Samsung S9	0.2997
	HTC	0.6045

2.1.4.2 Técnica Fuzzy AHP

Esta técnica tiene origen en el procedimiento de AHP; sin embargo, sufre algunas modificaciones para evitar las restricciones presentadas en la técnica de la cual está basada. Para abordar esta técnica, es importante conocer el concepto de lógica difusa, que es un método de análisis desarrollado a propósito para incorporar la incertidumbre en un modelo de decisión. En esencia permite considerar el razonamiento que es aproximado y no preciso.

Entre sus características principales según (Zadeh, 1996) citado en (Novák, Perfilieva, & Dvořák, 2016), el razonamiento exacto es un caso límite de razonamiento aproximado, el conocimiento es una colección de restricciones flexibles o variables difusas, además la inferencia es considerada un proceso de propagación de restricciones flexibles. En la lógica difusa existen aspectos importantes a destacar (Román del Valle, 2017):

Verdad: el valor de una proposición puede ser un conjunto poco específico de uno ordenado, por lo tanto, se supone que es un subconjunto borroso en el intervalo o un punto en el intervalo $[0,1]$.

Predicados: tienen carácter borros puesto que, no son precisos, algunos ejemplos son rápido, mucho más grande que.

Modificadores del predicado: actúan como instrumentos de cobertura, por ejemplo, muy, más bien, bastante.

Cuantificadores: interpretan una parte difusa, tal como por lo general, la mayoría.

Probabilidades: del tipo difusas como probable, poco probable, alrededor de 0.8 de alto, etc.

Debido a la capacidad limitada que poseen algunos decisores para explicar sus preferencias, (Buckley, 1985) incorporó una matriz difusa en el método AHP de tal forma que la vaguedad existente en las respuestas del proceso de decisión se encuentre involucrada citado en (Ahmad, Kasim, & Shanmugam, 2019), con el objetivo de tener mayor validez en el proceso de análisis de decisión (Huang & Wu, 2005). La técnica Fuzzy AHP (F-AHP), soluciona algunos defectos encontrados en la técnica AHP, tal como la escala limitada para la ponderación según el decisor, la ambigüedad e incertidumbre para hallar los valores en las comparaciones en un grupo de expertos. A continuación, se describen las etapas para la aplicación de esta técnica, mencionando similitudes con la técnica AHP:

Identificación de criterios y estructura jerárquica.

Tal como su predecesora, F-AHP realiza la jerarquización del problema e identificación de criterios, además de las alternativas del objeto de estudio de las cuales buscamos la mejor opción que cumpla con el objetivo planteado. A diferencia de AHP, se hace uso de los números triangulares difusos del 1 al 9, de donde los cinco números triangulares difusos (1,3,5,7,9) (ver

Figura 2.5), la escala de los números difusos con su equivalente función membresía se muestran posteriormente (ver Tabla 2.15).

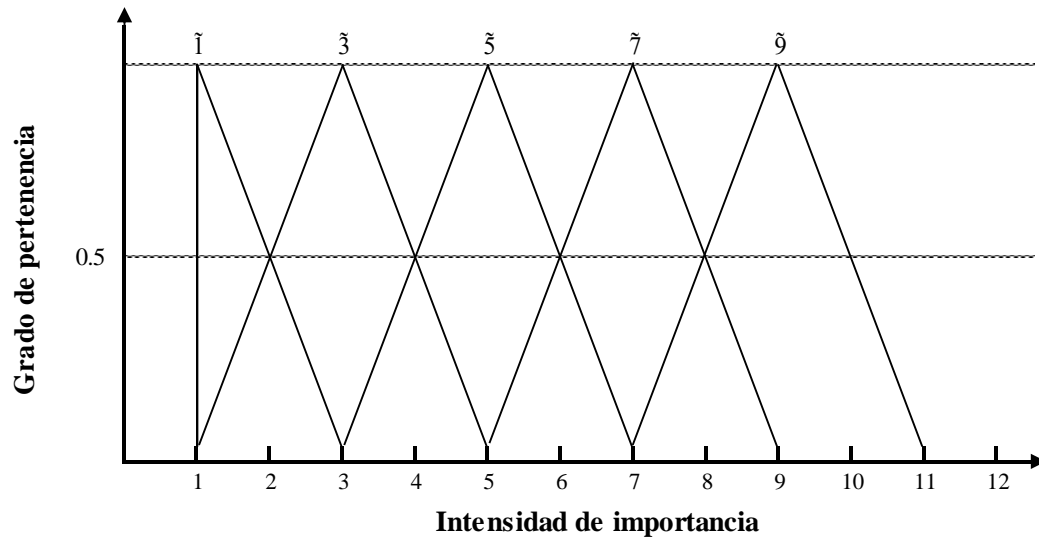


Figura 2.5 Función membresía para números difusos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.15 Escala de relación números difusos.

Fuente: (K. Patil, 2013) .

INTENSIDAD DE IMPORTANCIA	NÚMERO DIFUSO	DEFINICIÓN	FUNCIÓN DE MEMBRESÍA
1	$\tilde{1}$	Igual importancia	(1, 1, 3)
3	$\tilde{3}$	Débilmente importante	(1, 3, 5)
5	$\tilde{5}$	Muy importante	(3, 5, 7)
7	$\tilde{7}$	Importancia sobre el otro	(5, 7, 9)
9	$\tilde{9}$	Absoluta importancia	(7, 9, 11)
2,4,6,8	$\tilde{2}, \tilde{4}, \tilde{6}, \tilde{8}$	Valores intermedios para matizar	

Construcción de la matriz de comparación difusa

A partir del paso previo, se realizan las comparaciones de pares para los criterios y subcriterios surgidos de acuerdo con el caso (acción realizada por el grupo de expertos para tomar la decisión). La importancia se asigna mediante la escala de números difusos (ver Tabla 2.15). El procedimiento consiste en comparar cada

criterio i , consigo mismo y los demás. Obteniendo comparaciones pareadas, formando la Matriz de Comparación Difusa (MCD), donde el valor recíproco inverso es asignado de forma automática dentro de la matriz bajo la diagonal. Es decir, $\tilde{a}_{ij} = 1$ si i es igual a j , y $\tilde{a}_{ij} = (\tilde{1}, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9})$ o $\tilde{a}_{ij} = (\tilde{1}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1})$ si i no es igual a j . La matriz de comparaciones pareadas resulta de la siguiente forma (ver Tabla 2.16):

Tabla 2.16. Matriz comparaciones pareadas.

	1	\tilde{a}_{12}	\tilde{a}_{1n}
$\tilde{A} =$	\tilde{a}_{21}	1	\tilde{a}_{2n}
	\vdots	\vdots	\vdots
	\tilde{a}_{n1}	\tilde{a}_{n2}	1

Media geométrica para cálculo de pesos

De acuerdo con (Buckley, 1985) citado en (Ahmad et al., 2019), se calcula la media geométrica de los valores de cada criterio:

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n \tag{Ecuación 9}$$

A la ecuación previa son incorporados 3 procedimientos:

- i. Encontrar el vector suma \tilde{r}_i
 - ii. Encontrar el vector suma inverso (-1), reemplazando el número triangular para incrementar el orden.
 - iii. Para hallar el peso del criterio i (\tilde{w}_i), se multiplica cada \tilde{r}_i con este vector de reversa, obteniéndose la $\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = lw_i + mw_i + uw_i$
- Ecuación 10:

$$\widetilde{w}_i = \widetilde{r}_i \otimes (\widetilde{r}_i \oplus \widetilde{r}_i \oplus \dots \widetilde{r}_n)^{-1} = lw_i + mw_i + uw_i \quad \text{Ecuación 10}$$

Remoción del número difuso

Debido a que \widetilde{w}_i es un número triangular es necesario revertirlo, mediante el método del área central propuesto por (Chou & Chang, 2008):

$$M_i = \frac{lw_1 + mw_1 + uw_1}{3} \quad \text{Ecuación 11}$$

El resultado obtenido M_i no es un número difuso; sin embargo, necesita ser normalizado mediante la ecuación

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad \text{Ecuación 12}$$

Para mejorar la comprensión de la técnica, se lleva a cabo el procedimiento en el siguiente contenido.

Aplicación de la técnica Fuzzy AHP

Tal como se realizó en la técnica previa, se replicará la elección del celular con Fuzzy AHP. El proceso es similar como se indicó en la descripción de la técnica. El primer paso es la Matriz de Comparación Fuzzificada (ver Tabla 2.17). El vector suma \widetilde{r}_i (ver Tabla) resultante de los cálculos y los pesos fuzzificados de los criterios evaluados \widetilde{w}_i (ver Tabla 2.19) son la parte intermedia del procedimiento correspondiente al cálculo de la media geométrica.

Tabla 2.17. Matriz de Comparación Fuzzificada General.

CRITERIOS	Precio			Batería			Memoria			Cámara		
Precio	1	1	1	3	4	5	1	2	3	2	3	4
Batería	1/5	1/4	1/3	1	1	1	1/6	1/5	1/4	1/6	1/5	1/4
Memoria	1/3	1/2	1	4	5	6	1	1	1	1	2	3
Cámara	0.25	0.33	0.5	4	5	6	0.33	0.5	1	1	1	1

Tabla 2.18. Vector Suma \tilde{r}_i .

Vector suma			
	1.4310	1.8882	2.2679
	0.3540	0.3981	0.4611
	1.0592	1.3797	1.7826
	0.8027	0.9642	1.2457
TOTAL	3.6469	4.6302	5.7573
\tilde{r}_i .	0.1737	0.2160	0.2742

Tabla 2.19 Pesos fuzzificados \tilde{w}_i .

Fuzzy weights \tilde{w}_i		
0.2485	0.4078	0.6219
0.0615	0.0860	0.1264
0.1840	0.2980	0.4888
0.1394	0.2082	0.3416

Para eliminar el número triangular difuso, se aplica el método del área central (ver Tabla 2.20). El resultado es un número M ; sin embargo, necesita ser normalizado para tomar los valores correctos en la ponderación global final (ver

Tabla 2.21).

Tabla 2.20 . Remoción del número triangular difuso.

De-Fuzzification w_i
0.426
0.091

	0.324
	0.230
TOTAL	1.071

Tabla 2.21. Normalización de los pesos de los criterios.

Normalized Wi=
0.3979
0.0853
0.3022
0.2146

Para cada uno de los criterios, los pasos son repetitivos. A continuación se evalúa de forma individual el criterio Batería, donde los tres criterios restantes son sometidos a los mismos procedimientos. Iniciando con la matriz de comparación para las alternativas respecto a la capacidad de Batería que ofrecen los equipos (ver Tabla 2.22).

Tabla 2.22. Matriz de Comparación Fuzzificada Criterio Batería.

BATERIA	IPhone X			Samsung 9			HTC		
IPhone X	1	1	1	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2
Samsung 9	4	5	6	1	1	1	2	3	4
HTC	2	3	4	1/4	1/3	1/2	1	1	1

El vector suma \tilde{r}_i , y su inverso (\tilde{r}_i^{-}) (ver Tabla 2.23), resulta de la multiplicación de cada elemento del número triangular por el inverso de la dimensión de la matriz. A partir de estos resultados se calculan los pesos fuzzificados (ver Tabla 2.24).

Tabla 2.23. Vectores suma r_i .

	Vector suma		
IPhone X	0.347	0.406	0.500
Samsung 9	2.000	2.466	2.884

HTC	0.794	1.000	1.260
TOTAL	3.140	3.872	4.644
\tilde{r}_i	0.215	0.258	0.318

Tabla 2.24 Pesos fuzzificados criterio Batería.

Fuzzy weights \tilde{w}_i		
0.075	0.105	0.159
0.431	0.637	0.918
0.171	0.258	0.401

Para las siguientes operaciones es necesario convertir el número triangular difuso o fuzzificado en un número real, por lo tanto, se aplica el método del área central (ver Tabla 2.25). Para la normalización se divide cada número fuzzificado entre el total, para obtener el valor correspondiente (ver Tabla 2.26).

Tabla 2.25. Remoción de los números triangulares para los pesos del Criterio Batería.

De-Fuzzification w_i	
	0.113
	0.662
	0.277
TOTAL	1.052

Tabla 2.26. Normalización de los pesos criterio Batería.

Normalized W_i
0.1073
0.6295
0.2632

Una vez obtenidos los valores de los pesos para cada uno de los criterios involucrados, se hace una concentración de estos. Como se explicó antes, la cifra de cada peso es multiplicado por el valor de las alternativas (ver Tabla 2.27). El resultado final son los pesos globales para la elección de la alternativa óptima (ver

Tabla 2.28). Para este caso el resultado de la técnica F-AHP coincide de nueva cuenta con la alternativa de equipo HTC, con la diferencia del peso respecto a la técnica AHP.

Tabla 2.27. Matriz Valoración de las Alternativas con criterios.

	CRITERIO	Precio	Batería	Memoria	Cámara
	Wi	0.3979	0.0853	0.3022	0.2146
ALTERNATIVAS	iPhone X	0.0898	0.1073	0.0982	0.1073
	Samsung S9	0.2480	0.6295	0.5233	0.2632
	HTC	0.6622	0.2632	0.3785	0.6295

Tabla 2.28 Pesos globales para elección de alternativa.

PESOS GLOBALES	
iPhone X	0.098
Samsung S9	0.367
HTC	0.535

2.1.4.3 Técnica TOPSIS

El acrónimo para TOPSIS es Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (técnica de ordenación de preferencias por similitud a la situación ideal). Hwang y Yoon desarrollaron el método en 1981, para afrontar el dilema de trabajar con la solución ideal o no ideal (Gachet-Otáñez, 2002). En ésta técnica, la característica resaltante es la selección de una alternativa que posea la distancia geométrica más corta a la solución ideal positiva, así como la distancia geométrica más larga a la no ideal (Ruiz, 2015).

En TOPSIS, se define un índice de proximidad relativa. Consiste en combinar los valores de la cercanía a la solución ideal positiva y de lejanía, respecto a la no ideal. Esto con el fin de seleccionar aquella alternativa que tenga más proximidad con la solución ideal positiva. Esta postura se observa en la Figura 2.6 donde hay cinco alternativas (A-E), de un problema con dos criterios (C_1 , C_2). Aparecen los puntos ideal y anti-ideal, donde el punto C está más próximo al ideal, y el punto D, el más lejano al anti-ideal.

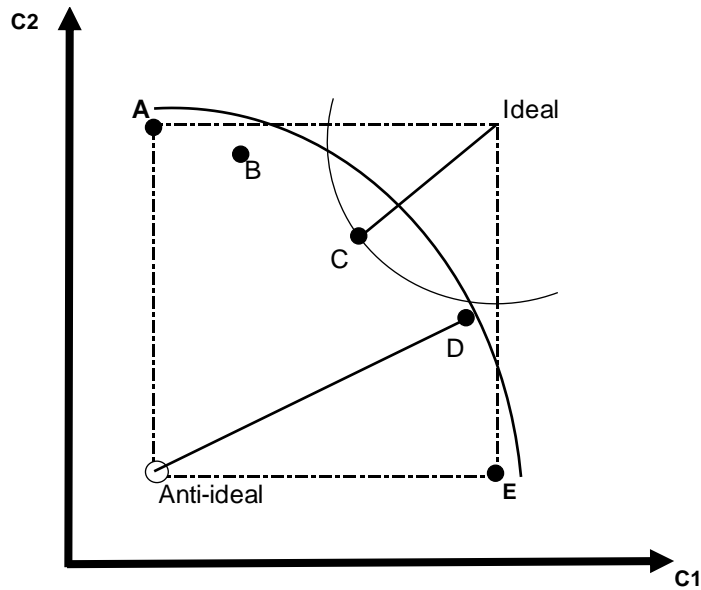


Figura 2.6. Ilustración de la distancia al ideal y anti-ideal.

Fuente:(Gachet-Otáñez, 2002)

TOPSIS busca para cada alternativa, calcular las distancias ponderadas al ideal y anti-ideal, de acuerdo con la métrica escogida obteniendo el radio de similitud a la solución ideal. Entre algunas de sus ventajas se encuentran: simplicidad, racionalidad, comprensibilidad, buena eficiencia computacional y la habilidad para medir el desempeño para cada alternativa (Roszkowska, 2011). Ésta técnica se ha empleado en diversas temáticas tales como la elección del mejor servidor nube para los clientes (R. R. Kumar & Kumar, 2017), evaluación de riesgos de inversión de minas (Liang, Zhao, & Wu, 2017), elección del dispositivo móvil ante un mercado amplio (Ruiz, 2015), selección de fresadoras para manufactura (Real y Vásquez & Maldonado-Macías, 2011) y selección de bombas para procesos de industria química (Michelotti-Díaz & García, 2016) por mencionar algunos. El procedimiento de evaluación de la técnica es:

1. Generar la matriz de decisión con los escenarios o alternativas m , y los criterios que serán utilizados n (ver Tabla 2.29):

Tabla 2.29. Matriz de decisión TOPSIS.

ALTERNATIVA	CRITERIOS			
	n ₁	n ₂	...	n _i
m ₁				
m ₂				
⋮				
a _i				

Es posible que los criterios se encuentren en distintas unidades. Comúnmente se estandarizan a beneficios económicos o son tratados los valores para tener la matriz en la misma dimensión.

2. Calcular los valores de la Matriz Normalizada A, mediante la siguiente ecuación:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{ij}^2)}} \quad \text{Ecuación 13}$$

3. Generar la Matriz coeficiente V, donde es asignado un peso (w) a cada uno de los criterios c_n, en el intervalo 0 - 1. Posteriormente cada valor de la matriz A es multiplicado por estos pesos (ver Tabla 2.30)

Tabla 2.30. Matriz coeficiente V.

PONDERACIÓN W	w ₁	w ₂	...	w ₃
	CRITERIOS			
ALTERNATIVA	n ₁	n ₂	...	n _i
m ₁				
m ₂				
⋮				
m _i				

4. Determinación de la solución ideal positiva e ideal negativa. Se determina el conjunto de valores mediante las siguientes relaciones:

$$A^+ = \{A_1^+, A_2^+, \dots, A_n^+\}, v_j^+ = \{\max_i (v_{ij}), j \in J^+; \min_i (v_{ij}), j \in J^-\} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}, v_j^- = \{\min_i (v_{ij}), j \in J^+; \max_i (v_{ij}), j \in J^-\} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde $J^+ = \{i = 1, 2, \dots, m\}$ cuando i está asociado a atributos deseables; $J^- = \{i = 1, 2, \dots, m\}$ cuando i está asociado a atributos indeseables.

5. Cálculo de las medidas de distancia. La distancia de cada alternativa positiva y negativa se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad \text{Ecuación 17}$$

Más cercano el valor al 0, menor la distancia a la solución ideal positiva y no ideal negativa.

6. Cálculo de proximidad relativa. Con la expresión de radio de similitud, aplicado a las alternativas y cuyos valores se acerquen a 1, mayor prioridad a la solución ideal tendrán.

$$RS_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}; i = 1, 2, \dots, m. \quad \text{Ecuación 18}$$

7. Ordenamiento de alternativas. De acuerdo con los valores obtenidos, se clasifican de manera ascendente, con el fin de elegir la solución ideal positiva.

Aplicación de la técnica TOPSIS

El punto de partida es la generación de la matriz de decisión con las alternativas m y los criterios que serán utilizados n . Como ejemplo, (ver Tabla 2.31) se muestran las calificaciones asignadas para la elección de un equipo móvil. En ésta, la puntuación más alta es diez, considerada como el mejor, así de forma descendente hacia el menos favorecido.

Tabla 2.31 Matriz Decisión Ejemplo TOPSIS.

MATRIZ DECISION				
CRITERIOS				
ALTERNATIVAS	Precio	Batería	Memoria	Cámara
IPhone X	4	6	7	8
Samsung S9+	5	7	7	8
HTC U11	7	6	6	7

El siguiente paso es calcular los valores de la Matriz Normalizada (ver Tabla 2.32) aplicando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Tabla 2.32 Matriz de Decisión normalizada TOPSIS.

MATRIZ DE DECISIÓN NORMALIZADA \bar{V}				
CRITERIO				
ALTERNATIVAS	Precio	Batería	Memoria	Cámara
IPhone X	0.42	0.55	0.60	0.60
Samsung S9+	0.53	0.64	0.60	0.60
HTC U11	0.74	0.55	0.52	0.53

Continúa la matriz coeficiente V , donde es asignado un peso (w) para cada uno de los criterios (c_n) en el intervalo 0 - 1. Cada valor de la matriz normalizada es multiplicado por dichos pesos, para obtener los datos de dicha matriz (ver Tabla 2.33).

Tabla 2.33 Matriz de Decisión Ponderada.

MATRIZ DE DECISIÓN PONDERADA				
PONDERACIÓN W=	0.3	0.2	0.2	0.3
ALTERNATIVAS	CRITERIOS			
	Precio	Batería	Memoria	Cámara
IPhone X	0.126	0.109	0.121	0.180
Samsung S9+	0.158	0.127	0.121	0.180
HTC U11	0.221	0.109	0.104	0.158

Con los valores obtenidos, es determinada la solución ideal positiva e ideal negativa (ver Tabla 2.34). Esto mediante la aplicación de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 2.34 Soluciones ideales positiva y negativa

DETERMINAC DE SOLUC IDEAL POSITIVA E IDEAL NEGATIVA				
A+	0.221	0.127	0.121	0.180
A-	0.126	0.109	0.104	0.158

La distancia de cada alternativa positiva y negativa se obtiene de las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2}$$

Ecuación 17

. Más cercano el valor al 0, menor es la distancia a la solución ideal positiva y mayor es la distancia a la no ideal negativa (ver Tabla 2.35).

Tabla 2.35 Distancia de alternativas

CALCULO DE LA MEDIDA DE DISTANCIA		
	positiva	negativa
IPhone X	0.097	0.028
Samsung S9+	0.063	0.046
HTC U11	0.034	0.095

Con la expresión de radio de similitud (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) aplicado a las alternativas y cuyos valores se acerquen a 1, mayor

prioridad a la solución ideal tendrán. De acuerdo con los valores obtenidos, se clasifican de manera ascendente con el fin de elegir la solución ideal positiva (ver Tabla 2.36)

Tabla 2.36 Proximidad relativa

PROXIMIDAD RELATIVA A LA ALTERNATIVA IDEAL Y ANTIIDEAL		RANKING
iPhone X	0.227	3
Samsung S9+	0.422	2
HTC U11	0.738	1

2.1.4.4 Técnica M-TOPSIS

Basado en el concepto original de TOPSIS, esta técnica calcula las distancias entre las alternativas y el punto ideal de referencia en el plano D^+ , D^- . Busca evitar las modificaciones al ordenamiento de alternativas y resolver el problema del fallo cuando las alternativas son simétricas (L. Ren, Zhang, Wang, & Sun, 2010). El procedimiento se describe a continuación:

1. Se genera la matriz de decisión con los escenarios o alternativas m , y los criterios que serán utilizados n (ver Tabla 2.37).

Tabla 2.37 Matriz de decisión M-TOPSIS.

ALTERNATIVA	CRITERIOS			
	n_1	n_2	...	n_i
m_1				
m_2				
\vdots				
a_i				

Es posible que los criterios se encuentren en distintas unidades. El criterio de costo se transforma a beneficio mediante su recíproco (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$X'_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} \quad \text{Ecuación 19}$$

2. Obtención de matriz normalizada A. Debido a que los criterios pueden tener distintas unidades, se normaliza en la matriz X para tener valores no dimensionales y convertir los atributos originales en el intervalo 0-1.

$$A=[a_{ij}]_{m \times n}, a_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X'_{ij})^2}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde a_{ij} queda como el valor normalizado; $i = 1, 2, m; j = 1, 2, \dots, n$.

3. Matriz coeficiente V. Permite a los decisores asignar pesos de importancia relativos (w) a un criterio n_i respecto de otro, en el intervalo 0 – 1 mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Posteriormente cada valor de la matriz A es multiplicado por estos pesos, resultando en la matriz mencionada previamente (ver Tabla 2.38).

$$v_{ij} = w_j \cdot a_{ij} \quad \text{Ecuación 21}$$

Tabla 2.38. Matriz coeficiente V.

PONDERACIONES W	w_1	w_2	...	w_3
	CRITERIOS			
ALTERNATIVA	n_1	n_2	...	n_i
m_1				
m_2				
\vdots				
m_i			v_{ij}	

4. Determinación de la solución ideal positiva e ideal negativa. La solución ideal (A^+) es el grupo de criterios con pesos normalizados, que indica los valores del criterio ideal (el valor máximo para beneficio y mínimo para costo). La solución No ideal (A^-) es el grupo de criterios con pesos normalizado, que

indica los valores de los criterios (el valor mínimo para beneficio y máximo para costo).

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}, v_j^+ = \{\max_i (v_{ij}), j \in J^+; \min_i (v_{ij}), j \in J^-\} v_{ij} = w_j \cdot a_{ij} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}, v_j^- = \{\min_i (v_{ij}), j \in J^+; \max_i (v_{ij}), j \in J^-\} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde $J^+ = \{i= 1, 2, \dots, m\}$ cuando i está asociado al criterio de beneficio;

$J^- = \{i= 1, 2, \dots, m\}$ cuando i está asociado al criterio de costo.

5. Cálculo de la distancia Euclidiana. Calcula las medidas de separación, usando la distancia Euclidiana n-dimensional.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_j^+ - V_{ij})^2} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_j^- - V_{ij})^2} \quad \text{Ecuación 25}$$

6. Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal. D^+ positiva y D^- negativa se encuentran primero en un plano finito. Después el plano $D^+ D^-$ se construye y se ubica el punto optimizado de referencia. Finalmente, la distancia relativa de cada alternativa al punto de referencia es calculada.

Ubicar el punto A ($\min D_i^+$, $\max D_i^-$) como *el punto optimizado de referencia*, ya que el objetivo es tener la distancia más baja entre los valores A^+ y lo más lejos de los valores A^- . El valor radio R_i se calcula como en la siguiente ecuación:

$$R_i = \sqrt{(D_i^+ - \min(D_i^+))^2 + (D_i^- - \max(D_i^-))^2} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde $i= 1, 2, \dots, m$.

7. Ordenamiento de Rango. Las alternativas se organizan en orden creciente de acuerdo con R_i . La mejor alternativa es aquella que con el coeficiente más cercano a 0.

Aplicación de la técnica MTOPSIS

Se genera la matriz de decisión con los escenarios o alternativas m , y los criterios que serán utilizados n . Es posible que los criterios se encuentren en distintas unidades, por lo que se adapta la información con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, resultando la Tabla 2.39.

Tabla 2.39 Matriz de Decisión.

MATRIZ DE DECISIÓN				
ALTERNATIVAS	Precio	Batería	Memoria	Cámara frontal
iPhone X	22000.00	2716	64	7
Samsung S9+	20999.00	3500	64	8
HTC U11	17400	3000	64	16

Puesto que los criterios tienen distintas unidades, se normaliza la matriz para tener valores no dimensionales y convertir los atributos originales en el intervalo 0-1 mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Tabla 2.40 Matriz Normalizada.

MATRIZ NORMALIZADA				
ALTERNATIVAS	Precio	Batería	Memoria	Cámara frontal
iPhone X	0.6278	0.5076	0.5773	0.3644
Samsung S9+	0.5993	0.6541	0.5773	0.4164
HTC U11	0.4965	0.5607	0.5773	0.8329

En la matriz de decisión ponderada (ver Tabla 2.41) son asignados los pesos de importancia (w) a un criterio (n_i) respecto de otro, en el intervalo de cero a uno. Posteriormente cada valor de la matriz normalizada es multiplicado por estos pesos, resultando en la matriz mencionada anteriormente.

Tabla 2.41 Matriz de Decisión Ponderada.

MATRIZ DE DECISIÓN PONDERADA				
-------------------------------------	--	--	--	--

PONDERACIÓN W=	0.3	0.2	0.2	0.3
ALTERNATIVAS	Precio	Batería	Memoria	Cámara frontal
iPhone X	0.188362577	0.10152534	0.11547	0.109321633
Samsung S9+	0.17979208	0.13083162	0.11547	0.12493901
HTC U11	0.148977675	0.11214139	0.11547	0.249878019

La solución ideal positiva (A⁺) es el grupo que indica los valores del criterio ideal, de acuerdo con el propósito buscado en dichos criterios. La solución No ideal negativa (A⁻) indica los valores de los criterios que menos benefician de acuerdo con el fin buscado.

Tabla 2.42 Solución ideal y no ideal.

A+	0.148977675	0.13083162	0.11547	0.249878019
A-	0.188362577	0.10152534	0.11547	0.109321633

Se realizan los cálculos de las medidas de separación entre las alternativas evaluadas, usando la distancia Euclidiana n-dimensional (ver Tabla 2.43)

Tabla 2.43 Distancia Euclidiana.

ALTERNATIVAS	D +	D -
iPhone X	0.149	0.000
Samsung S9+	0.129	0.034
HTC U11	0.019	0.146

La última etapa es ubicar el punto A (min D⁺, máx. D⁻) como *el punto optimizado de referencia*, ya que el objetivo es tener la distancia más baja entre los valores A⁺ y la mayor distancia a los valores A⁻. Cada uno de los puntos para cada alternativa es situado en un plano finito D⁺ D⁻. El valor radio *R_i* se calcula, para organizar las alternativas en orden creciente y tener la solución óptima con el valor más cercano a cero.

Tabla 2.44 Ranking de alternativas.

ALTERNATIVAS	R_i	Ranking
iPhone X	0.196	3
Samsung S9+	0.157	2
HTC U11	0.000	1

Lo anteriormente dicho es reflejado en la Figura 2.7, donde la alternativa HTC U11 es el punto con la menor distancia D_i^+ , y la mayor distancia al D_i^- .

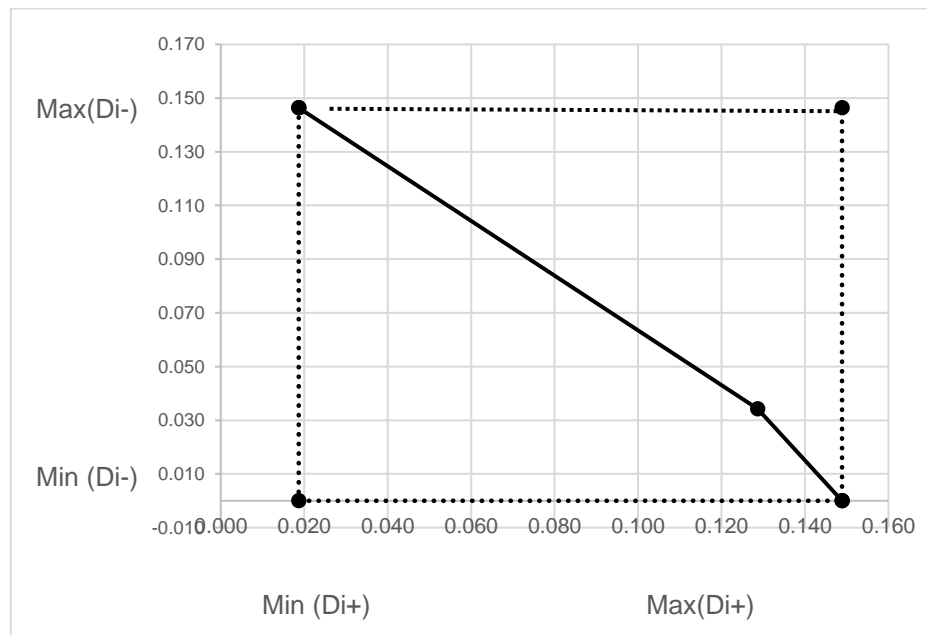


Figura 2.7 Elección de celulares TOPSIS.

2.2 Marco Contextual

2.2.1 Ecodiseño

El concepto del ecodiseño es relativamente nuevo; sin embargo, existen investigaciones de su aplicación en productos, en referencia a la selección de materiales y creación de métodos para producción; también relacionado a la innovación en empresas. A continuación, se hace una breve descripción de las investigaciones junto con sus autores.

Knight & Jenkins (2009) proponen un marco de referencia para identificar la aplicación de las técnicas de ecodiseño en un nuevo producto a partir de la compatibilidad de los procesos de desarrollo. Este marco consta de cinco etapas. La prueba y validación surge del uso de tres herramientas: check list, lineamientos y una matriz de materia, energía y toxicidad, para el uso de productos específicos y el diseño de estos. Lee, Lee, Choi, & Lee (2016) sugieren un método de ecodiseño que considera las emisiones de gases de efecto invernadero, así como el costo del

material de un producto únicamente. La aplicación de la metodología es en un vehículo ferroviario, concluyendo que el método propuesto es simple, transparente y con menor cantidad de suposiciones para considerar las emisiones y el costo del material para un producto. Allione, De Giorgi, Lerma, & Petruccelli , (2012) proponen una lista de lineamientos de ecodiseño para ayudar a la selección del material, mejorando el desempeño del producto en su ciclo de vida. La lista surge de tres principales eco estrategias: uso de recursos con un bajo impacto ambiental, extensión de vida del material y políticas y éticas ambientales. Platcheck et al, (2008) propone una metodología de ecodiseño para el desarrollo de productos sustentables, con el objetivo de realizar cambios importantes en el ambiente, sociedad y economía. Además de tener en cuenta la necesidad de un enfoque holístico en el producto e identificar las mejores oportunidades de innovación. Una aportación importante tiene como autores a (Deutz, McGuire, & Neighbour, 2013), en ella se menciona el reconocimiento del ecodiseño como punto de intervención en el ciclo de vida del producto en los círculos académicos y políticos. Sin embargo, establecen que es necesario un marco de referencia regulatorio, a fin de vincular el concepto con los principios del diseño teórico. Otra aportación importante es la propuesta por (Morales-Mendoza et al., 2017) que realiza el acoplamiento del Análisis de Ciclo de Vida con la Simulación de Procesos para el Ecodiseño de Procesos Químicos.

Relacionado a las empresas e innovación, (Santolaria, Oliver-Sol, Gasol, Morales-Pinzón, & Rieradevall, 2011) contribuyen al escaso conocimiento del ecodiseño y el desarrollo sostenible en la innovación de las compañías españolas, así como las modificaciones en las estrategias de estas. Short et al., (2012) presentan un estudio relacionado a la intervención del ecodiseño en empresas, para conocer los motivos de las compañías del norte de Inglaterra que no adoptan las medidas del ecodiseño. Para compararlo, realizan encuestas en industrias manufactureras de Suecia (país considerado ambientalmente más avanzado que Inglaterra), con un cuestionario idéntico para ambos países como instrumento de medición, donde los resultados hacen referencia al riesgo o aversión asociado a tomar en cuenta el ecodiseño como estrategia en la compañía.

2.2.2 Ecodiseño en las biorrefinerías

La aplicación del ecodiseño también está relacionada con el desarrollo de mejores plantas energéticas en el consumo de energía. De modo que el uso de energía por fuentes no renovables sea menor, reduciendo el impacto en el ambiente. En relación a esto, Foulet et al., (2017) buscan mediante un proyecto, usar basura orgánica local como combustible para la producción de químicos, que representen una opción atractiva con la alta disponibilidad y los bajos costos de insumos. El objetivo del proyecto BIORARE es evaluar como tecnologías bioelectroquímicas pueden combinarse a instalaciones de tratamiento de desechos para impulsar biorrefinerías produciendo químicos basados en desechos. El estudio de (Julio, Albet, Vialle, Vaca-Garcia, & Sablayrolles, 2017) propone una nueva metodología para el ecodiseño en los procesos de biorrefinería, además de mostrar las prácticas existentes en el desarrollo de procesos. La propuesta parte de facilitar el ecodiseño y el desarrollo sostenible en los procesos de la biorrefinería, tratando las posibles dificultades con la evaluación simultánea de las tres dimensiones o pilares de la sostenibilidad. Con relación a las dificultades presentadas por la cantidad de información y la necesidad del curso de acción a seguir, el análisis de decisiones multicriterio es una herramienta conveniente.

2.2.3 Análisis de decisiones multicriterio

Como se menciona en el marco conceptual, el análisis de decisiones multicriterio (MCDM) se encuentra en la cotidianidad, así como en problemas complejos. Por lo que se describen algunas contribuciones de distintos autores en la aplicación de diversas técnicas y temas. Para comenzar, Özcan, Elebi, & Esnaf (2011) realizan una comparación de las técnicas más aceptadas en el análisis de decisiones multicriterio. Abordando las principales características, desventajas y ventajas de estos. Posteriormente, son aplicados a un caso de estudio que presenta una problemática para la localización de un almacén en el sector minorista. La técnica Fuzzy AHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) ha sido utilizada para la toma de decisiones de distintos ámbitos, tal como (Rios et al., 2016) con la aplicación de esta en Fenómenos Meteorológicos Adversos en las Comunidades Autónomas de

España, puesto que abarca una cantidad considerable de información con posibles impactos en la vida y bienes de las personas con tiempo limitado. En el estudio se busca generar alertas, comunicados y avisos a la población. Otro caso similar con Fuzzy AHP tiene por autor a (Ayhan, 2013), que aplica la técnica a una compañía de engranajes de motor para la determinación del mejor proveedor respecto a un conjunto seleccionado de criterios. Así mismo (Büyüközkan, Çifçi, & Güteryüz, 2011) utiliza la misma técnica, realizando un análisis de las estrategias del cuidado a la salud, a fin de comprobar que los servicios están enfocados en el cliente además tener mejoras continuas. También (Kilinci & Onal, 2011) aplica la selección de proveedores debido a la importancia de los costos de la materia prima y componentes, puesto que montos considerables derivan en el proceso de compra.

Boufateh et al., (2012) utiliza PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluation) y ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) para demostrar que, el uso de análisis de decisión multicriterio como herramienta complementaria en un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), proporciona más confiabilidad a los resultados del ACV para su aceptación. Otro autor que emplea ELECTREE es (Murgante, Salmani, Qelichi, & Hajilo, 2017) para elegir la ciudad con mejores opciones de sustentabilidad a futuro, contrastando aquellas con historial de sismos. También es importante mencionar que a partir de técnicas ya existentes, algunos autores aportan metodologías que emplean estas para darle solución a diferentes problemáticas, como (J. Ren et al., 2016) que proponen una metodología de MCDM para la priorización de la sustentabilidad en los sistemas industriales. Esta incluye el método AHP y ANP (Analytic Network Process) para calcular las ponderaciones de los criterios, y PROMETHEE para priorización de los sistemas alternativos sustentables. Esta metodología se desarrolló en un caso de estudio para tecnología en la producción sustentable de cinco alternativas.

El uso de las técnicas de MCDM juegan un papel vital, los decisores enfrentan mayores desafíos para el diseño de nuevos sistemas que incluyan diversidad de criterios y objetivos. Cinelli et al., (2014) considera adecuado el uso de las técnicas de MCDM para las evaluaciones del desempeño sustentable, debido a la flexibilidad y posibilidad del intercambio entre especialistas, analistas y científicos; en el estudio

se realiza una revisión del desempeño de cinco técnicas, respecto a diez criterios cruciales de la sustentabilidad, posteriormente menciona los resultados, ventajas y desventajas del uso de cada método. J. J. Wang, Jing, Zhang, & Zhao (2009) mencionan que la popularidad de las técnicas de MCDM en la toma de decisiones para energía sustentable ha incrementado debido a la multidimensionalidad y complejidad que enfrenta la sustentabilidad. Lleva a cabo una revisión de las técnicas en cada una de sus etapas. Sabaei et al., (2015) menciona que para compañías que buscan durar en el mercado competitivo de la manufactura, escoger la técnica apropiada para el análisis de decisiones multicriterio es un rol vital. El estudio revisa distintas técnicas de MCDM, evaluándolas y realizando comparaciones desde el punto de vista de la gestión de mantenimiento. Como ha sido descrito en este apartado los alcances del MCDM son variados. En la siguiente sección se muestran algunas aportaciones con relación a las biorrefinerías.

2.2.4 Análisis de decisiones multicriterio en biorrefinerías

Existen diversos trabajos de investigación que abordan el Análisis de Decisión Multicriterio con sus diversas técnicas, aunado a biorrefinerías y sustentabilidad. Entre ellos se encuentra (Sanaei, 2014) donde desarrolla un sistema con alcance a la etapa temprana de diseño y toma de decisiones, mediante la evaluación de criterios de sustentabilidad, incertidumbre y riesgo, a fin de identificar estrategias adecuadas para la biorrefinería. A. Kumar et al., (2017) realiza una revisión de varias técnicas de MCDM aplicables a las energías renovables, puesto que la planeación del uso de energía cada vez es más compleja debido a las consideraciones técnicas, sociales, económicas y ambientales.

Un estudio sobresaliente que aborda la problemática de la elección del ecodiseño óptimo en una biorrefinería es el trabajo realizado por (Quintero-Bermúdez, Janssen, Cohen, & Stuart, 2014) que desarrolla una metodología para la evaluación temprana de los procesos de biorrefinería. Esto empleando MCDM con el objetivo de descartar opciones menos prometedoras, a través de tres paneles de especialistas encargados de ponderar un conjunto de ocho criterios.

Por otro lado, (Meixner, 2009) presenta un enfoque en la búsqueda de alternativas energéticas, donde evalúa estas con el referente existente, para conocer cuál es la mejor. Por ejemplo, (Sakthivel, Ilangkumaran, & Gaikwad, 2014) hacen uso de las técnicas TOPSIS y VIKOR para evaluar la mezcla óptima de biodiesel, basado en el análisis de desempeño, parámetros de combustión y emisiones de un cilindro. Un estudio que propone una metodología para definir el orden del conjunto de soluciones usando programación lineal integral con restricciones es presentado por (Celebi, Ensinas, Sharma, & Maréchal, 2017). En este, aplican un acercamiento sistemático que adopta la optimización termo-ambiental junto con la integración de calor para evaluar el desempeño económico, el impacto ambiental y los requerimientos de energía de varias opciones de procesos.

CAPÍTULO 3 . OBJETIVOS

3.1 Justificación con planteamiento del problema

La dependencia de las fuentes tradicionales de energía causan daños al medio ambiente debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (Sovacool, 2012). Actualmente, la escasez en los recursos fósiles funge como motor para el desarrollo de ideas en la producción de energías renovables. Un ejemplo es la conversión de biomasa para la producción de biocombustibles en una biorrefinería. Para ello, la aplicación del desarrollo sostenible es una opción prometedora. Sin embargo, la complejidad crece en la unión de todos los factores inmersos y para abordar esta problemática se propone el empleo del análisis de decisiones multicriterio, que facilita la selección de un curso de acción entre las alternativas existentes al enfrentar situaciones complejas con variedad de criterios. A partir de esta determinación, se propone una metodología para evaluar los distintos diseños de producción de biodiesel en biorrefinerías, tomando dos casos de estudio para la validación de la propuesta.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo General

Seleccionar el ecodiseño óptimo en casos de estudio de biorrefinerías productoras de biodiesel mediante el análisis de decisión multicriterio.

3.2.2 Objetivos Particulares

- Seleccionar casos de estudios representativos de biorrefinerías productoras de biodiesel.
- Aplicar una metodología para la selección de ecodiseños en casos de estudio de biorrefinerías productoras de biodiesel, mediante las técnicas de análisis de decisión multicriterio.
- Automatizar las técnicas de análisis de decisión multicriterio utilizadas en la evaluación de la metodología a través de hojas de cálculo.

CAPÍTULO 4 . MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es de alcance descriptivo

4.2 Enfoque cuantitativo-cualitativo (o mixto)

Con enfoque mixto, debido a la aplicación teórica de las técnicas de MCDM en casos de estudio con datos numéricos.

4.3 Diseño

Diseño no experimental

4.4 Unidad de análisis o sujeto

Las unidades de análisis son dos trabajos de posgrado enfocados al diseño y operación de biorrefinerías productoras de diésel, con distinta materia prima como insumo.

4.5 Diagrama de flujo de la metodología

Como se menciona previamente en el marco conceptual, en el diseño y evaluación de una biorrefinería se emplean distintos criterios que generan alternativas de acuerdo con el objetivo planteado. Debido a la cantidad basta de información utilizada, el análisis de decisión multicriterio con sus técnicas es considerado como una buena opción para la toma de decisiones. Autores tales como (Stibel, 2014) (ver Figura 4.1) y Ley (2002) (ver Figura 4.2) tienen semejanzas en el proceso del análisis de decisiones. En ambas metodologías, el punto de partida es identificar la situación que necesita la toma de decisión. Al concretar este primer punto, el decisor marcará el camino a seguir. Como un segundo paso general, la información más relevante asociada a la decisión es reunida, dando pie a la determinación de objetivos a alcanzar o criterios según el caso, además de las preferencias que el decisor seguirá. Dentro la problemática afrontada, las alternativas existirán o serán generadas a partir de los objetivos buscados. Continuará la evaluación de las alternativas mediante los objetivos o criterios con la aplicación de alguna técnica de

MCDM, y finalmente la selección de la alternativa que cumpla con el objetivo. Con base en la revisión de literatura respecto al proceso de análisis decisión multicriterio, se propone la metodología mostrada en la Figura 4.3 . Este consta de tres niveles para su desarrollo, el contenido de cada nivel se explica en los siguientes apartados.

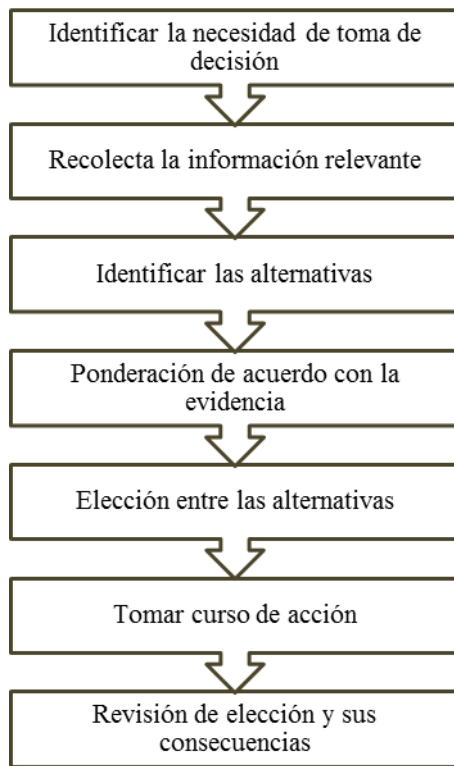


Figura 4.1 Proceso para el Análisis de Decisiones.

Fuente: Stibel, 2014.

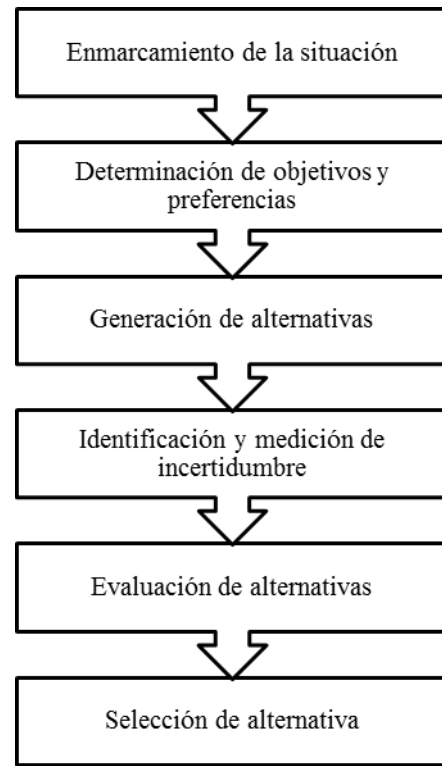


Figura 4.2 Procesos del Análisis de Decisiones.

Fuente: Ley, 2002

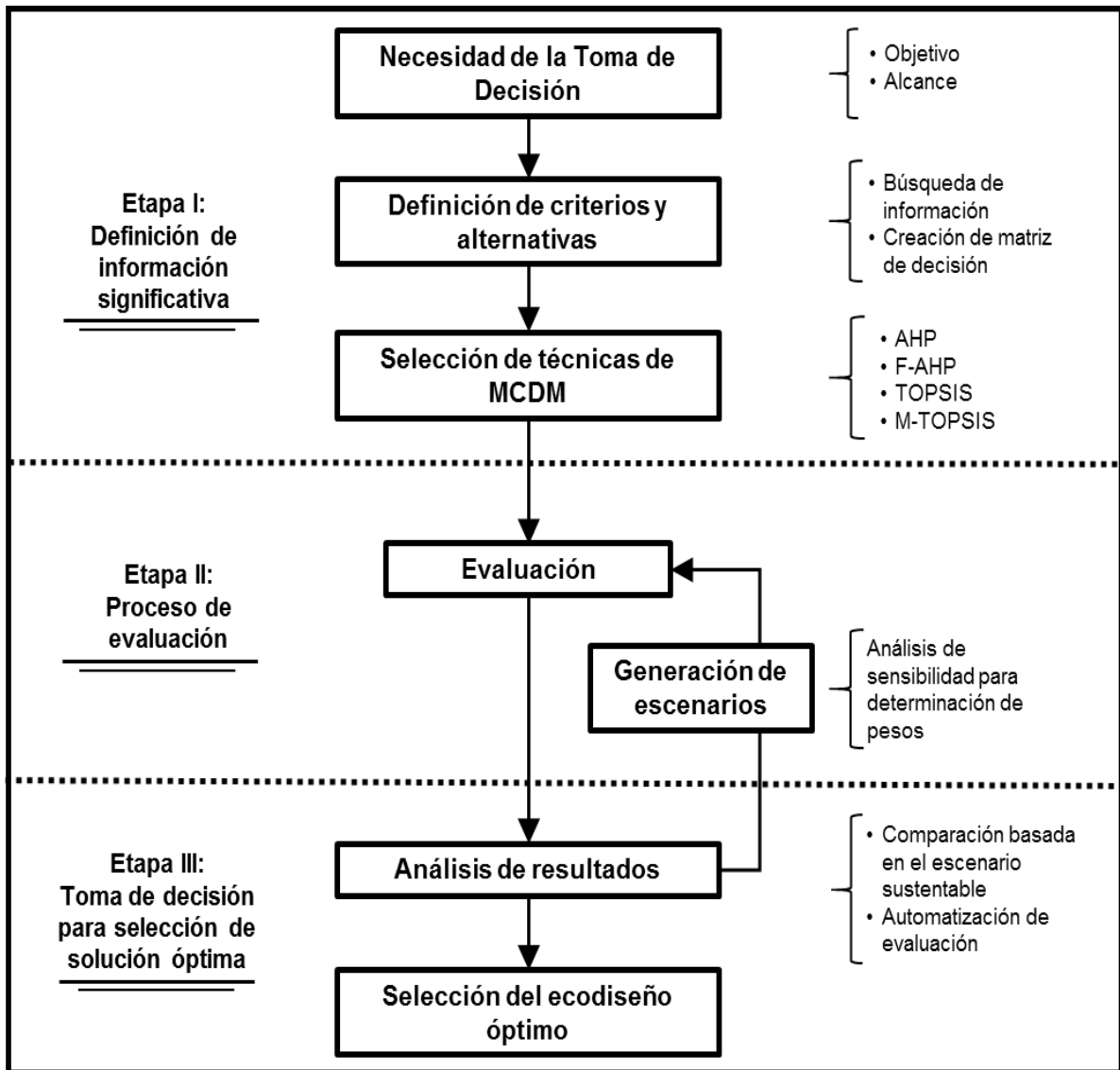


Figura 4.3 Metodología propuesta para la elección del ecodiseño óptimo.

Fuente: Elaboración propia

4.6 Metodología

Etapa I: Definición de información significativa

En esta primera etapa, como punto de partida es primordial que el decisor (DM) establezca cual es la necesidad que lleva a resolver un conflicto complicado debido a los múltiples factores asociados. El DM definirá los objetivos y limitantes del alcance para aplicar distintas técnicas de MCDM para encontrar la solución al conflicto. A partir de este punto, el DM tiene la capacidad para definir los elementos

más sobresalientes que influyen en la situación en conflicto, es decir los criterios, así como las alternativas que dan solución. Como último paso de esta etapa, es la selección de las técnicas de análisis de decisión. Para la metodología propuesta son elegidas cuatro técnicas:

- i. Comenzando con AHP (Proceso de jerarquía analítica), basado en la idea de resolver un problema clasificando los factores individualmente para analizar la relación entre ellos (Saaty, 1980), (Velasquez & Hester, 2013). Su característica principal es la comparación por pares (criterios, alternativas), así como la asignación de ponderaciones a los factores (ver Tabla 2.3). Varios autores (San Cristóbal Mateo, 2012),(Quaddus et al., 2011) sugieren el uso de esta técnica para la evaluación de la sostenibilidad, así como para la selección de energías renovables.
- ii. Para abordar las mejoras presentadas a la técnica original de AHP, también se utiliza en el análisis Fuzzy AHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process). La lógica difusa es un método de análisis que permite la incorporación de la incertidumbre en un modelo de decisión. Esto significa que el razonamiento es aproximado y no preciso (Zadeh, 1996), (Román del Valle, 2017). También proporciona aspectos importantes de la lógica difusa en la técnica para el razonamiento aproximado, eliminando la imprecisión en las respuestas del proceso de decisión (Huang & Wu, 2005). La escala utilizada en esta técnica se muestra en la Tabla 2.15.
- iii. La tercera técnica es TOPSIS (Técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal) creada por (Hwang & Yoon., 1981). Se basa en la selección de la alternativa que tiene la distancia geométrica más corta a la solución positiva ideal, así como a la distancia más larga a la solución no ideal (Ruiz, 2015). Sus ventajas incluyen simplicidad, racionalidad, comprensibilidad, buena eficiencia computacional y la capacidad de medir el rendimiento de cada alternativa (Roszkowska, 2011).
- iv. Finalmente, M-TOPSIS, basado en el concepto original de TOPSIS, calcula las distancias entre las alternativas y el punto de referencia ideal en el plano

D + y D-, evitando fallas cuando las alternativas son simétricas (Lifeng Ren, Zhang, Wang, & Sun, 2007).

Esta selección se realizó a partir de una revisión de la literatura que destaca que AHP y TOPSIS, así como sus versiones actualizadas (que son fáciles de usar y constituyen herramientas efectivas para el análisis de sistemas) pueden resolver problemas de decisión reduciendo decisiones complejas con un pequeño número de parámetros en comparación con Electre o Promethée (Yu, Zhang, Liao, & Qi, 2018), (Pohekar & Ramachandran, 2004).

Etapas II: Proceso de evaluación

Esta etapa es un proceso de dos pasos indirectamente vinculado. Para el primero, la determinación y asignación de pesos equitativos a los criterios se hace para crear el escenario sostenible. Esto está hecho considerando las características de las técnicas seleccionadas para este estudio. No hay un orden preciso para la evaluación ya que el DM elige las técnicas. Sin embargo, se recomienda realizar al menos dos técnicas para un análisis adecuado. Para la técnica AHP, de acuerdo con la Tabla 2.3, el número más cercano a igual la importancia es el valor 2, ya que no es posible usar el valor uno en toda la matriz puesto que carecería de sentido, debido al uso exclusivo en la comparación de un criterio contra sí mismo. Este valor se asigna en la matriz de decisión para todas las comparaciones realizadas, a fin de mantener el índice de consistencia debajo del diez por ciento (como lo dicta el procedimiento de la técnica). Para la técnica F-AHP y teniendo en cuenta la misma consideración para la igualdad en los criterios involucrados, el número triangular (ver Tabla 2.15) más cercano a igual importancia usado es (1, 2,3) en la matriz de decisión principal. Los pesos asignados en TOPSIS y M-TOPSIS dependen de la cantidad de criterios involucrados en el conflicto, haciendo el esfuerzo por distribuir los pesos de manera equitativa. Todos deben ser positivos, la suma de todos los pesos debe ser igual a uno y lo más importante, ningún criterio debe tener un peso significativo sobre los demás.

El segundo paso se realiza después del análisis de resultados para el escenario sostenible. De este punto, el juicio subjetivo del DM crea escenarios y asigna pesos

de acuerdo con un análisis de sensibilidad para realizar una reevaluación para cada escenario creado, con el fin de reconocer las diferencias entre una tendencia ambiental y económica frente a lo sostenible. De ahí que los pesos dados a cada escenario se basen en las dos tendencias mencionadas anteriormente. Para el escenario ambiental, los criterios asociados con esta tendencia tienen los mayores pesos asignados (según la técnica utilizada) para resaltar la orientación ambiental, pero también los pesos más bajos se asignan en los criterios económicos en TOPSIS y MTOPSIS. Esto se hace por los procedimientos de la técnica en sí, donde el grupo de criterios con los pesos más altos sirven como un punto de inflexión asociado a la tendencia. Para las técnicas AHP y F-AHP, es importante asignar y mantener los mismos números de importancia entre los criterios ambientales, y colocar los números recíprocos más bajos para criterios económicos con el fin de mantener el índice de consistencia debajo del diez por ciento (para la técnica AHP). Para el escenario económico, la asignación de pesos y números de importancia se hace beneficiando esta tendencia, utilizando los mismos valores que en el escenario mencionado anteriormente dejando a la parte ambiental en desventaja en este nuevo escenario económico.

Etapa III: Toma de decisión para selección de solución óptima

El proceso de toma de decisión finaliza con un proceso de dos pasos, es decir, análisis de resultados y selección óptima del ecodiseño. En el primer paso, los resultados de cada técnica se estudian primero individualmente para el escenario sostenible que es la configuración óptima buscada. De modo tal que es posible identificar qué ecodiseño está mejor clasificado para ser seleccionado como el óptimo. Con base en este resultado, la creación de los dos escenarios descritos en la etapa II se realiza, con la nueva evaluación económica y ambiental de los escenarios. Teniendo en cuenta los resultados de estas dos tendencias, la selección óptima del ecodiseño para cada escenario se compara, verificando si la selección basada en la sostenibilidad cambia con respecto a estas tendencias.

La metodología diseñada es una herramienta de validación y sustento para la toma de decisión, el DM considerará si las características del ecodiseño óptimo cumplen

por sí mismas con los requerimientos necesarios para dar solución a la problemática abordada. Así mismo, para facilitar el trabajo del DM en la toma de decisión, la automatización es realizada mediante la programación en el lenguaje VBA® (Visual Basic for Applications) en hojas de cálculo (Microsoft Excel®). Esta automatización está basada en el procedimiento de TOPSIS propuesto en (Hwang & Yoon., 1981). El desarrollo de esta herramienta permite agilizar la evaluación y evitar los errores de cálculo involuntarios en la toma de decisión, gracias a la facilidad de ingreso de información así como del procedimiento de la herramienta.

CAPÍTULO 5 . RESULTADOS

Con el fin de cumplir los objetivos planteados en este trabajo, dos casos de estudio pertenecientes al Proyecto Clúster Biodiesel Avanzado (Cemie-Bio) son seleccionados y evaluados con la metodología diseñada. Estos estudios combinan conocimiento, capacidad humana y material, infraestructura de universidades, centros de investigación y empresas para el desarrollo, validación y promoción de tecnologías sustentables y limpias. En estos casos particulares, la creación de biorrefinerías para la producción de biodiesel utiliza materias primas como la *Jatropha Curcas* y microalgas. El objetivo de aplicar la metodología en los casos de estudio es validar y fundamentar las respuestas obtenidas en las investigaciones originales, a través de los procedimientos de las técnicas de análisis de decisión multicriterio. La descripción de los casos de estudio, la adaptación de información a la metodología y resultados se presentan en las siguientes secciones.

5.1 Caso de estudio 1

La investigación presentada por (Pineda-Navarro, 2016), evaluó la sustentabilidad de siete procesos de diseño para el aprovechamiento integral de la biomasa de *Jatropha Curcas*. La información de cultivo de esta planta se obtuvo de plantaciones piloto en Yucatán. A partir de esta información, se definieron los ecodiseños para la producción de biodiesel. Los primeros cinco ecodiseños BPP están enfocados en la producción del combustible alternativo, calor y energía con distintos tipos de insumo. Por otro lado, los ecodiseños IBP-1, -2 incluyen además de los productos ya mencionados, subprocesos de pirólisis y digestión anaeróbica (ver Tabla 5.1). Los criterios utilizados en el estudio fueron extraídos de (Sacramento-Rivero, 2012), que considera diversos factores para asegurar la sustentabilidad de las biorrefinerías como son Participación de Energías no Renovables (NRES) que mide la cantidad de energía fósil utilizada para la operación de la biorrefinería comparando la versión fósil y recursos naturales; Reducción de Emisiones de Línea base (RBE), mide la reducción de recursos naturales con la operación de la biorrefinería sobre la versión de referencia; el Potencial de Valorización Biotecnológica (BVP), mide la factibilidad de la biomasa como fuente de insumo; Fracción de Ingresos por Materia Prima

(FRF), mide el precio del mercado para los productos de acuerdo con el precio del insumo; Margen Bruto Modificado (MGM), que mide el desempeño general de la biorrefinería; Uso sostenible de la tierra (SLU), mide la reducción de emisiones ambientales antes y después que la biorrefinería es puesta en marcha; Reducción del uso de agua dulce (WR), de acuerdo con el sistema fósil de referencia; Relación Costo de materia prima (RCR), mide el costo de los insumos sobre el sistema fósil; Consumo de material primas (RMC), mide el consumo de insumos renovables sobre su producción; Grado de empleo (EE), refiere a la creación de empleos en la biorrefinería; Índice de comunidad normalizado (NCDI), que hace referencia a la capacidad de inversión de la biorrefinería en proyectos sociales. La evaluación económica se llevó a cabo mediante un análisis tecno económico, mientras que el desempeño ambiental fue evaluado mediante un análisis de ciclo de vida, con el uso del software Simapro®¹.

La información mencionada previamente, es considerada para la aplicación de la metodología (ver Figura 4.3) en la selección del ecodiseño óptimo de una biorrefinería. Para la etapa I, la necesidad de la toma de decisión se presenta en conocer cual configuración de procesos en la biorrefinería tiene mejores características en desarrollo sostenible. La definición de criterios son los once mencionados previamente, y las alternativas de ecodiseño son siete, de acuerdo con el tipo de configuración de procesos para la producción de biodiesel (BPP-A, B, C, D; IBP-1, 2) descritos anteriormente. El tercer paso de esta etapa es la selección de técnicas de MCDM, que para este caso de estudio son consideradas AHP, F-AHP, TOPSIS, M-TOPSIS. En la segunda etapa está el proceso de evaluación, siguiendo la tendencia al desarrollo sostenible todos los criterios son ponderados con la misma importancia para las cuatro técnicas seleccionadas. Para la última etapa, son analizados los resultados, para seleccionar el ecodiseño óptimo como último paso de la metodología. Sin embargo, durante el análisis de resultados se

¹ <https://simapro.com/>

opta por realizar un análisis de sensibilidad, cambiando los pesos de distintos criterios para crear tres escenarios adicionales que sigan la tendencia ambiental, económica y social. De esta forma, después de una reevaluación que beneficie dichas orientaciones es posible comparar en el análisis de resultados, las variaciones del ordenamiento para cada escenario con las técnicas aplicadas.

Tabla 5.1 Descripción de ecodiseños del CE1

ECODISEÑO	DESCRIPCIÓN
BPP	Biorrefinería de plataforma única para producción de biodiésel a partir de aceite de <i>Jatropha Curcas</i> .
BPP-A	Biorrefinería de dos plataformas para producción de biodiésel a partir de aceite de <i>Jatropha Curcas</i> .
BPP-B	Biorrefinería de dos plataformas para producción de biodiésel a partir de biomasa de <i>Jatropha Curcas</i> .
BPP-C	Biorrefinería de dos plataformas para producción de biodiésel, calor y energía a partir de biomasa de <i>Jatropha Curcas</i> .
BPP-D	Biorrefinería de dos plataformas para producción de biodiésel, calor y energía a partir de biomasa de <i>Jatropha Curcas</i> .
IBP-1	Biorrefinería de cinco plataformas para la producción de biodiésel, glicerina, fosfato de potasio, calor y energía, biometano, bio-aceite y bio-carbono a partir de biomasa de <i>Jatropha Curcas</i> .
IBP-2	Biorrefinería de cuatro plataformas para la producción de biodiésel, glicerina, fosfato de potasio, calor y energía, bio-aceite y bio-carbono a partir de biomasa de <i>Jatropha Curcas</i> .

Técnica AHP

Comenzando con esta técnica, la Tabla 5.2 corresponde al escenario sostenible que está asociado directamente a la necesidad de la toma de decisión para seleccionar la alternativa óptima. El valor asignado dos es necesario para mantener el equilibrio, ya que de usar el valor uno los procedimientos de la técnica serían inútiles. En este escenario todos los criterios tienen igual importancia. El escenario ambiental (ver Tabla 5.3) beneficia a los criterios ambientales sobre los económicos y sociales. Para los criterios económicos y sociales se mantiene una

importancia semejante para mantener el índice de consistencia debajo del diez por ciento. Para el escenario económico (ver

Tabla 5.4), son beneficiados los criterios FRF, MGM, RCR con valores de importancia mayores que el resto. Los criterios sobrantes utilizan valores bajos de importancia para reducir la participación y mantener el índice de concordancia. El último escenario (ver Tabla 5.5), beneficia a los criterios sociales (EE y NCDI) con los valores altos de importancia, manteniendo el resto de los criterios con el valor más bajo posible. La comparación del escenario sostenible con el resto de los escenarios (ver Tabla 5.6) muestra las variaciones en el ordenamiento de acuerdo con la tendencia seguida en cada opción.

Tabla 5.2 Matriz Jerarquización Escenario Sostenible CE1, AHP.

MATRIZ COMPARACIÓN											
CRITERIOS	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
RMC	1/2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
FRF	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
MGM	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2	2	2
NRES	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2	2
WR	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2
RCR	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2
SLU	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2
RBE	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2
EE	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2
NCDI	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1

Tabla 5.3 Matriz Jerarquización Escenario Ambiental CE1, AHP.

MATRIZ COMPARACIÓN											
CRITERIOS	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1	3	7	7	3	3	7	3	3	7	7
RMC	1/3	1	7	7	3	3	7	3	3	7	7
FRF	1/7	1/7	1	2	1/7	1/7	2	1/7	1/7	2	2
MGM	1/7	1/7	1/2	1	1/7	1/7	2	1/7	1/7	2	2
NRES	1/3	1/7	7	7	3	7	3	3	7	7	7
WR	1/3	1/3	7	7	1/3	1	7	3	3	7	7
RCR	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1/7	1/7	1	1/7	1/7	2
SLU	1/3	1/3	7	7	1/3	1/3	7	1	2	7	7
RBE	1/3	1/3	7	7	1/3	1/3	7	1/2	1	7	7
EE	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1/7	1/2	1/7	1/7	1	2
NCDI	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1/7	1/2	1/7	1/7	1/2	1

Tabla 5.4 Matriz Jerarquización Escenario Económico CE1, AHP.

MATRIZ COMPARACIÓN											
CRITERIOS	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1	2	1/7	1/7	2	2	1/7	2	2	2	2
RMC	1/2	1	1/7	1/7	2	2	1/7	3	3	7	7
FRF	7	7	1	3	7	7	3	7	7	7	7
MGM	7	7	1/3	1	7	7	3	7	7	7	7
NRES	1/2	1/2	1/7	1/7	1	2	1/7	2	2	2	2
WR	1/2	1/2	1/7	1/7	1/2	1	1/7	2	2	2	2
RCR	7	7	1/3	1/3	7	7	1	7	7	7	7
SLU	1/2	1/3	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1	2	2	2
RBE	1/2	1/3	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1/2	1	2	2
EE	1/2	1/2	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1/2	1/2	1	2
NCDI	1/2	1/2	1/7	1/7	1/2	1/2	1/7	1/2	1/2	1/2	1

Tabla 5.5 Matriz Jerarquización Escenario Social CE1, AHP.

MATRIZ COMPARACIÓN											
CRITERIOS	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1/5	1/5
RMC	1/2	1	2	2	2	2	2	2	2	1/5	1/5
FRF	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2	2	1/5	1/5
MGM	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2	1/5	1/5
NRES	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2	1/5	1/5
WR	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	1/5	1/5
RCR	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	1/5	1/5
SLU	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	1/5	1/5
RBE	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1/5	1/5
EE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	2
NCDI	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.50	1

Tabla 5.6 Ranking de Evaluación AHP

ALTERNATIVAS	ESCENARIOS			
	SUSTENTABLE	AMBIENTAL	ECONÓMICO	SOCIAL
BPP	2	4	3	1
BPP-A	5	5	5	3
BPP-B	6	6	7	5
BPP-C	7	7	6	7
BPP-D	3	2	4	6
IBP-1	4	3	2	4
IBP-2	1	1	1	2

Técnica F-AHP

A continuación, se evalúa el CE1 con la Técnica *F-AHP*, con funcionamiento similar a su predecesora, con la característica del uso de números triangulares difusos para la reducción de incertidumbre asociada a la subjetividad de la técnica.

El escenario sostenible (ver Tabla 5.7) utiliza el número triangular más bajo

posible, con el objetivo de mantener la misma importancia para todos los criterios. Por otro lado, el escenario ambiental (ver Tabla 5.8) mantiene los mismos valores de importancia entre sus criterios con la diferencia de sobresaltar respecto a los criterios económicos y sociales. Esto debido al funcionamiento de la comparación de matrices, donde las filas aventajan a las columnas. Esto sucede también en el escenario económico (ver Tabla 5.9) donde los criterios ambientales y sociales tienen bajos valores de importancia. Por el contrario, los criterios económicos (FRF, MGM y RCR) tienen altos valores de importancia en la fila que les corresponde, así como el inverso de estos números de importancia en la columna que les corresponde. Para el escenario social (ver

Tabla 5.10) se mantienen valores bajos de importancia de los números triangulares, y para las columnas que corresponden a los criterios EE y NCDI, se utilizan los números triangulares inversos para beneficiar totalmente a esta tendencia. Los resultados del ordenamiento de las alternativas (ver Tabla 5.11) demuestran de nueva cuenta que el ecodiseño IBP-2 predomina en 3 de los 4 escenarios.

Tabla 5.7 Matriz Jerarquización Escenario Sustentable CE1, F-AHP.

CRITERIA	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
RMC	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
FRF	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
MGM	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
NRES	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
WR	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
RCR	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
SLU	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3
RBE	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3
EE	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3
NCDI	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1

Tabla 5.8 Matriz Jerarquización Escenario Ambiental CE1, F-AHP.

CRITERIA	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1 1 1	1 1 3	5 7 9	5 7 9	1 3 5	1 3 5	5 7 9	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9
RMC	1/5 1/3 1	1 1 1	5 7 9	5 7 9	1 3 5	1 3 5	5 7 9	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9
FRF	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 1 1	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 2 3	1 2 3
MGM	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1 1 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 2 3	1 2 3
NRES	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	5 7 9	5 7 9	1 1 1	1 3 5	5 7 9	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9
WR	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	5 7 9	5 7 9	1/5 1/3 1	1 1 1	5 7 9	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9
RCR	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 1 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 2 3	1 2 3
SLU	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	5 7 9	5 7 9	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	5 7 9	1 1 1	1 3 5	5 7 9	5 7 9
RBE	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	5 7 9	5 7 9	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	5 7 9	1/5 1/3 1	1 1 1	5 7 9	5 7 9
EE	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 1 1	1 2 3
NCDI	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/3 1/2 1	1 1 1

Tabla 5.9 Matriz Jerarquización Escenario Económico CE1 F-AHP.

CRITERIA	BVP			RMC			FRF			MGM			NRES			WR			RCR			SLU			RBE			EE			NCDI					
BVP	1	1	1	1	2	3	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1/5	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
RMC	1/3	1/2	1	1	1	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1/5	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
FRF	5	7	9	5	7	9	1	1	1	1/9	1/7	1/5	5	7	9	5	7	9	1	2	3	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9
MGM	5	7	9	5	7	9	1/5	1/3	1	1	1	1	1	3	5	5	7	9	1	3	5	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9
NRES	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/5	1/3	1	1	1	1	1	3	5	1/9	1/7	1/5	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
WR	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1/5	1/3	1	1	1	1	1/9	1/7	1/5	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
RCR	5	7	9	5	7	9	1/3	1/2	1	1/5	1/3	1	5	7	9	5	7	9	1	1	1	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9
SLU	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
RBE	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3
EE	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3
NCDI	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/9	1/7	1/5	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1

Tabla 5.10 Matriz Jerarquización Escenario Social CE1, F-AHP.

CRITERIA	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BVP	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
RMC	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
FRF	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 1 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
MGM	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
NRES	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
WR	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
RCR	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
SLU	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
RBE	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
EE	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	1 1 1	1 1 3
NCDI	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	1/3 1 1	1 1 1

Tabla 5.11 Ranking de escenarios evaluados F-AHP

ALTERNATIVAS	RANKING			
	SUSTENTABLE	AMBIENTAL	ECONOMICO	SOCIAL
BPP	3	2	4	1
BPP-A	5	5	5	4
BPP-B	6	6	7	6
BPP-C	7	7	6	7
BPP-D	4	3	3	5
IBP-1	2	4	2	3
IBP-2	1	1	1	2

Técnica TOPSIS

Para la aplicación de esta técnica, es necesario el uso de los datos obtenidos en el caso de estudio original (ver Tabla 5.12) la parte baja tiene los valores asociados a cada criterio. La parte alta contiene las ponderaciones asignadas a cada criterio de acuerdo con la tendencia seguida en cada uno de los escenarios. El resultado de cada escenario (ver Tabla 5.13) muestra concordancia con lo obtenido en las técnicas previamente aplicadas. De acuerdo con el funcionamiento de la técnica, se busca que la alternativa tenga la menor distancia positiva al plano D+, con la máxima distancia negativa a la solución no ideal en el plano D- (ver Figura 5.1).

Tabla 5.12 Matriz Datos -Ponderaciones CE1.

MATRIZ DATOS-PONDERACIONES											
SUSTENTABLE	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.1	0.09	0.09
AMBIENTAL	0.15	0.15	0.02	0.02	0.15	0.15	0.02	0.15	0.15	0.02	0.02
ECONOMICO	0.0125	0.0125	0.3	0.3	0.0125	0.0125	0.3	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
SOCIAL	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.4	0.4
ALTERNATIVAS	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
BPP	0.8667	0.9524	1.2060	1.4675	2.3745	11.2844	2.2797	0.41	1.8238	0.1429	1.3
BPP-A	0.8667	0.9524	1.2061	1.5415	2.3263	11.2906	2.4042	0.41	1.8114	0.1429	1.3
BPP-B	0.8667	0.9524	1.2081	1.5636	2.1712	11.4326	2.4395	0.41	1.7997	0.1429	1.3
BPP-C	0.8667	0.9524	1.0920	1.6463	2.1600	10.4210	2.5266	0.41	1.6138	0.1429	1.3
BPP-D	0.8667	0.9524	0.9425	1.7840	1.2826	7.8065	2.3089	0.41	1.0966	0.1429	1.3
IBP-1	0.8667	0.9524	0.6051	1.0471	1.5063	8.3942	2.3467	0.41	0.9368	0.1429	0
IBP-2	0.8667	0.9524	0.4432	0.7926	1.2854	6.9450	1.8868	0.41	0.5321	0.1429	0

Tabla 5.13 Ranking de alternativas CE1- TOPSIS.

ALTERNATIVAS	ESCENARIOS			
	SUSTENTABLE	AMBIENTAL	ECONÓMICO	SOCIAL
BPP	5	6	4	4
BPP-A	7	7	5	6
BPP-B	6	5	7	7
BPP-C	4	4	6	5
BPP-D	3	3	3	3
IBP-1	2	2	2	2
IBP-2	1	1	1	1

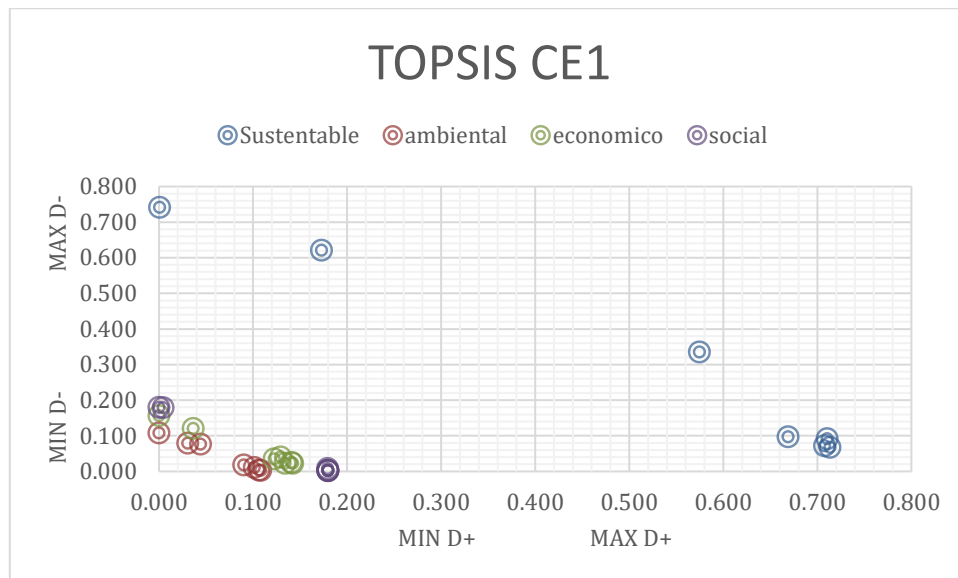


Figura 5.1 Localización de alternativas CE1-TOPSIS

Técnica M-TOPSIS

Esta técnica tiene procedimiento similar a la previa, por lo que solo se muestran las ponderaciones designada para cada escenario (ver Tabla 5.14). De acuerdo con el escenario evaluado, los criterios que sirven como punto de flexión se benefician con un valor de ponderación más alto que el resto. Los resultados coinciden con lo obtenido con su predecesora (ver Tabla 5.15). Esto se refleja de la misma forma con lo mostrado en el gráfico del plano D+, D- (ver Figura 5.2).

Tabla 5.14 Ponderaciones aplicadas en MTOPSIS-CE1.

CRITERIA	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE	EE	NCDI
SUSTENTABLE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AMBIENTAL	0.15	0.15	0.02	0.02	0.15	0.15	0.02	0.15	0.15	0.02	0.02
ECONOMICO	0.0125	0.0125	0.3	0.3	0.0125	0.0125	0.3	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
SOCIAL	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.4	0.4

Tabla 5.15 Ranking de alternativas CE1- MTOPSIS.

ALTERNATIVAS	SUSTENTABLE	AMBIENTAL	ECONÓMICO	SOCIAL
BPP	6	7	4	4
BPP-A	7	6	6	6
BPP-B	5	5	7	7
BPP-C	4	4	5	5
BPP-D	3	3	3	3
IBP-1	2	2	2	2
IBP-2	1	1	1	1

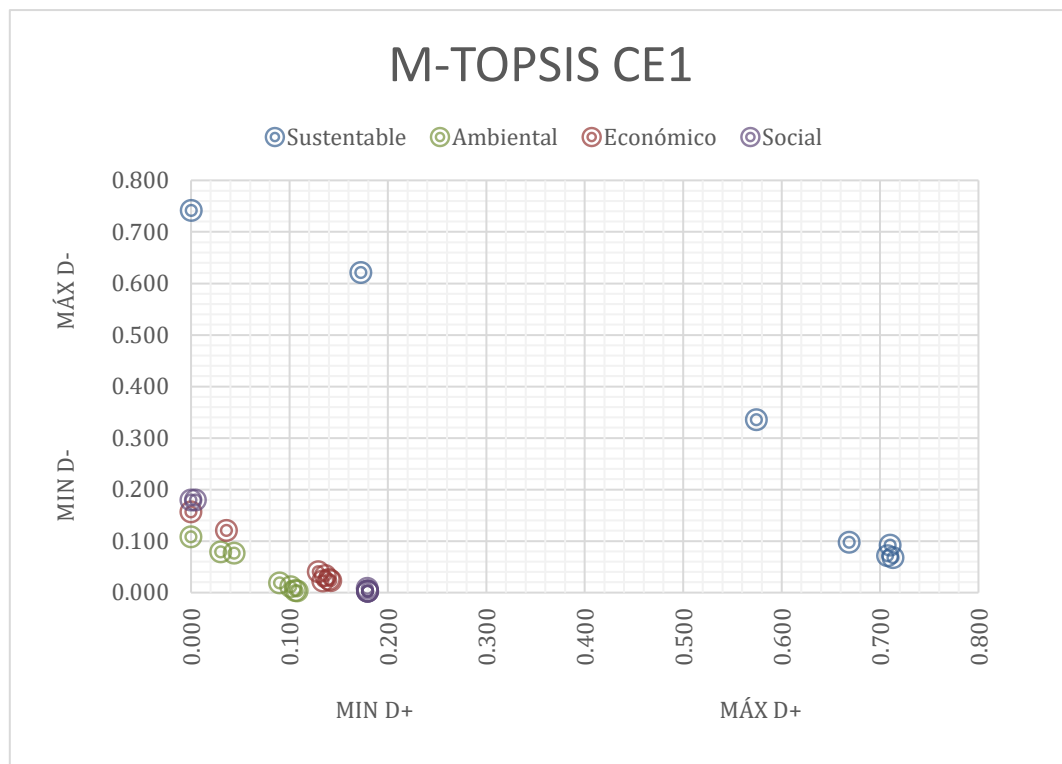


Figura 5.2 Localización de alternativas por escenarios del CE1 en MTOPSIS.

5.2 Caso de estudio 2

La aportación de (Cuevas-Castillo, 2017) consiste en la evaluación de las distintas opciones de valorización de los coproductos de una biorrefinería en la producción de biodiesel a partir de microalgas. En su planteamiento, busca la existencia de alguna relación entre el incremento del número de procesos, costos, emisiones y requerimientos energéticos que sea equivalente para ambas opciones (biodiesel-productos o biodiesel). A partir de esto, surge la toma de decisión con el objetivo de elegir la configuración de procesos para la producción de biodiesel óptima de acuerdo con los elementos establecidos en el CE2. El estudio realiza un análisis tecno-económico de una biorrefinería con microalgas como materia prima. De acuerdo con la autora, el análisis tecno económico es fundamental para la toma de decisiones. Para el factor ambiental es realizado un análisis de ciclo de vida, donde se mide el impacto ambiental potencial a través del inventario de las materias primas y energía utilizadas durante todo el ciclo de vida del producto. La especie utilizada para la evaluación de la biorrefinería es la *Chlorella Vulgaris* con la metodología desarrollada por (Peters & Timmerhaus, 2002)). Debido al alcance del propio estudio, sólo son evaluados tres escenarios para la toma de decisión: sustentable, ambiental y económico. Para estimar los indicadores económicos, son considerados únicamente los insumos, servicios y productos asociados a cada proceso de acuerdo con los precios del año 2016. Los criterios seleccionados para la toma de decisión son Razón de energía neta (NER), Costos operativos (Co), Ingresos Netos (Ing. Neto) y Costos de operación (Co). Para el análisis de ciclo de vida en el aspecto ambiental, se consideran diez criterios que son Acidificación (ADP), Agotamiento de recursos abióticos (AP), Eutrofización (EP), Potencial de calentamiento global (GWP), Agotamiento de la capa estratosférica de ozono (ODP), Toxicidad sobre la salud humana (HTP), Ecotoxicidad de recursos hídricos (FWEP), Ecotoxicidad de recursos hídricos marinos (MWEPE), Ecotoxicidad terrestre (TEP), Oxidación fotoquímica (POP). En el estudio están determinados ocho configuraciones de procesos de ecodiseño, donde el proceso base es la producción de biodiesel convencional. Los ecodiseños están divididos de acuerdo con el aprovechamiento de la biomasa de microalgas y la glicerina cruda, cinco valorizan la biomasa

microalgal y los restantes a la glicerina cruda (ver Tabla 5.16). Las técnicas de MCDM seleccionadas para aplicar de nueva cuenta la metodología propuesta son F-AHP y MTOPSIS.

Tabla 5.16 Descripción de ecodiseños CE2

<i>Valorización de la biomasa microalgal</i>	
B1	Uso fertilizante
B2	Uso nutriente
B3	Combustión
B4	Digestión anaerobia
B5	Pirólisis
<i>Valorización de la glicerina cruda</i>	
G1	Uso glicerina cruda
G2	Glicerina 98%
G3	Hidrogenólisis

Técnica F-AHP

Como se realizó en el caso de estudio previo, los números triangulares de importancia utilizados para la comparación en el escenario sustentable (ver Tabla 5.17) son [1, 2,3]. Esto debido a que es el número triangular más cercano al significado de misma igualdad. Para el escenario ambiental (ver Tabla 5.18) se mantuvieron valores bajos en las comparaciones entre criterios de esta tendencia, por el contrario, en las comparaciones entre criterios ambientales y económicos, se asignaron los valores más altos. Para el escenario económico (ver Tabla 5.19) se asignaron los valores inversos más altos para las columnas correspondientes a los criterios económicos (NER, Co, Ingreso Neto) para beneficiar a esta tendencia. Los resultados de los tres escenarios evaluados (ver Tabla 5.20) muestran al ecodiseño B3 como el óptimo (sustentable y ambiental) y B1 para el económico.

Tabla 5.17 Matriz Jerarquización Escenario Sustentable- FAHP, CE2.

CRITERIA	ADP	AP	EP	GWP	ODP	HTP	FWEP	MWEP	TEP	POP	NER	Co	INGRESO NETO
ADP	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
AP	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
EP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
GWP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
ODP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
HTP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
FWEP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
MWEP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
TEP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
POP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 1 2	3 1 2	3 1 2
NER	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3
Co	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3
INGRESO NETO	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1

Tabla 5.18 Matriz Jerarquización Escenario Ambiental - FAHP, CE2.

CRITERIA	ADP	AP	EP	GWP	ODP	HTP	FWEP	MWEP	TEP	POP	NER	Co	ING NETO
ADP	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
AP	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
EP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
GWP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
ODP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
HTP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
FWEP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
MWEP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
TEP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	1 3 5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
POP	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1/5 1/3 1	1 1 1	5 7 9	5 7 9	5 7 9
NER	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	5 7 9	5 7 9	5 7 9
Co	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 1 1	5 7 9
INGRESO NETO	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1 1 1

Tabla 5.19 Matriz Jerarquización Escenario Económico - FAHP, CE2.

CRITERIA	ADP	AP	EP	GWP	ODP	HTP	FWEP	MWEP	TEP	POP	NER	Co	INGNETO
ADP	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	19 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
AP	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
EP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
GWP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
ODP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
HTP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
FWEP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
MWEP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
TEP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
POP	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
NER	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	1 1 1	1/9 1/7 1/5	1/9 1/7 1/5
Co	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	1 1 1	1/9 1/7 1/5
INGRESO NETO	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	5 7 9	1 1 1

Tabla 5.20 Ranking de alternativas - FAHP, CE2

ALTERNATIVA	SUSTENTABLE	AMBIENTAL	ECONÓMICO
B1	2	2	1
B2	4	4	4
B3	1	1	2
B4	5	5	5
B5	3	3	3
G1	6	6	6
G2	7	7	8
G3	8	8	7

Técnica M-TOPSIS

Como se ha dicho anteriormente, para esta técnica es necesario hacer uso de los datos obtenidos en el estudio original (ver Tabla 5.21) para la evaluación, así como la asignación de ponderaciones que favorezcan algún escenario con cierta tendencia. Las ponderaciones asignadas a cada escenario varían de acuerdo con la tendencia seguida (ver Tabla 5.22).

Los resultados obtenidos (ver

Tabla 5.23) muestran que el ecodiseño que ocupa el primer lugar en los tres escenarios es B1. Se anexa de igual forma, un gráfico (ver Figura 5.3) que muestra la dispersión de los ecodiseños de acuerdo con la tendencia que siguen en el plano D+, D-.

Tabla 5.21 Matriz Datos -MTOPSIS, CE2.

ALTERNATIVAS	ADP	AP	EP	GWP	ODP	HTP	FWEP	MWEP	TEP	POP	NER	Co	ING NETO
B1	3.01E+05	3.82E+05	5.77E+04	3.21E+07	1.04E+00	1.22E+07	2.36E+06	1.01E+10	1.23E+05	1.32E+04	0.14	0	1.84
B2	3.01E+05	3.82E+05	5.77E+04	3.21E+07	1.04E+00	1.22E+07	2.36E+06	1.01E+10	1.23E+05	1.32E+04	0.14	-0.92	0
B3	2.37E+05	3.65E+05	5.91E+04	2.55E+07	1.05E+00	1.12E+07	2.12E+06	8.76E+09	1.36E+05	1.22E+04	0.18	-1.02	0
B4	3.11E+05	4.21E+05	7.80E+04	3.55E+07	1.10E+00	1.33E+07	2.65E+06	1.10E+10	1.37E+05	1.37E+04	0.14	0.78	1.79
B5	2.94E+05	5.15E+05	1.33E+05	3.55E+07	1.12E+00	1.30E+07	1.12E+07	1.01E+10	1.77E+05	1.87E+04	0.21	2.33	1.24
G1	3.11E+05	3.92E+05	5.95E+04	3.33E+07	1.10E+00	1.33E+07	2.65E+06	1.10E+10	1.37E+05	1.36E+04	0.14	0	0.08
G2	3.11E+05	3.92E+05	5.96E+04	3.33E+07	1.10E+00	1.33E+07	2.68E+06	1.10E+10	1.37E+05	1.44E+04	0.14	0.19	0.29
G3	3.11E+05	3.93E+05	5.95E+04	3.33E+07	1.10E+00	1.33E+07	2.65E+06	1.10E+10	1.37E+05	1.37E+05	0.14	0.39	0.56

Tabla 5.22 Matriz de Ponderaciones -MTOPSIS, CE2.

ALTERNATIVAS	ADP	AP	EP	GWP	ODP	HTP	FWEP	MWEP	TEP	POP	NER	Co	ING NETO
SUSTENTABLE	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
AMBIENTAL	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.02	0.02	0.02
ECONÓMICO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.3	0.3	0.3

Tabla 5.23 Ranking de alternativas -MTOPSIS, CE2.

ALTERNATIVAS	SUSTENTABLE	AMBIENTAL	ECONÓMICO
B1	1	1	1
B2	3	3	3
B3	2	2	2
B4	4	4	4
B5	8	8	8
G1	5	5	5
G2	6	6	7
G3	7	7	6

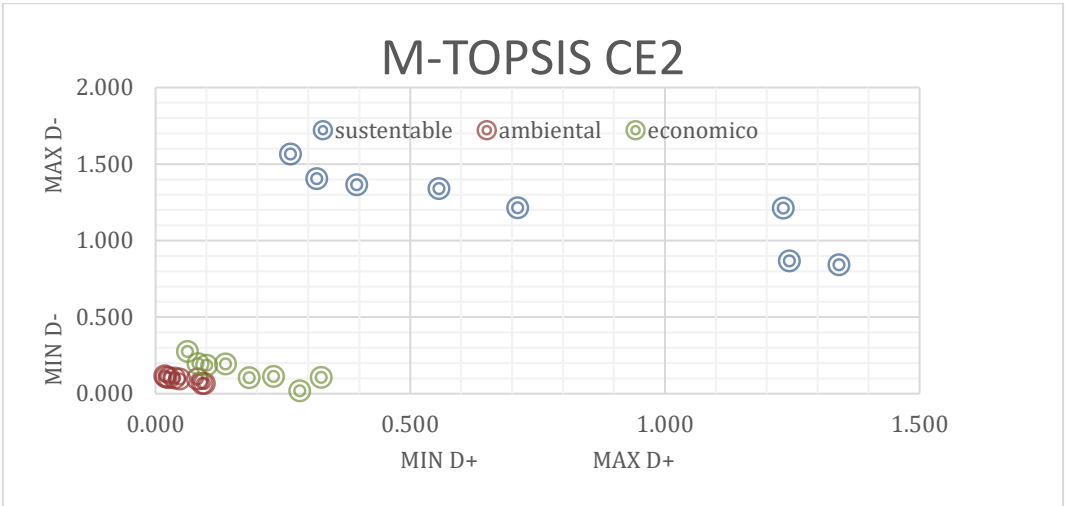


Figura 5.3 Localización de alternativas por escenarios del CE2 en M-TOPSIS

5.3 Herramienta de automatización

Respecto a la automatización de las técnicas (objetivos específicos) se realizó la técnica TOPSIS mediante hojas de cálculo y macros. En la interfaz inicial (ver Figura 5.4) el DM debe ingresar en las celdas marcadas en gris el número de criterios y alternativas que están implicados en la problemática abordada. Así mismo, si desea que el proceso de cálculos sea visible. El siguiente paso es dar clic en el botón “1. Decision matrix” para desplegar la matriz donde el DM deberá llenar con la información correspondiente a cada alternativa y los distintos criterios relacionados (ver Figura 5.5). Así mismo, el DM deberá seleccionar para cada criterio que desea obtener de acuerdo con el tipo de información: valor máximo “Max” o valor mínimo “Min”. Además la ponderación o peso que corresponda para cada criterio de acuerdo con la importancia o preferencia que tenga el DM (ver Figura 5.6). Posteriormente el DM deberá dar clic en el botón “2. Results” (ver Figura 5.7) para que la macro lleve a cabo los cálculos de la técnica, de modo tal que el resultado sea el ranking en orden descendente donde la alternativa con el primer puesto será la óptima. Mediante esta hoja de cálculo, el DM reduce el tiempo invertido en la toma de decisión puesto que teniendo en su poder la información necesaria, el vaciado de datos puede tomar alrededor de 10 minutos. Que de realizar manualmente los cálculos de la técnica podrían tomarle hasta dos horas en el entendimiento y ejecución de cálculos.

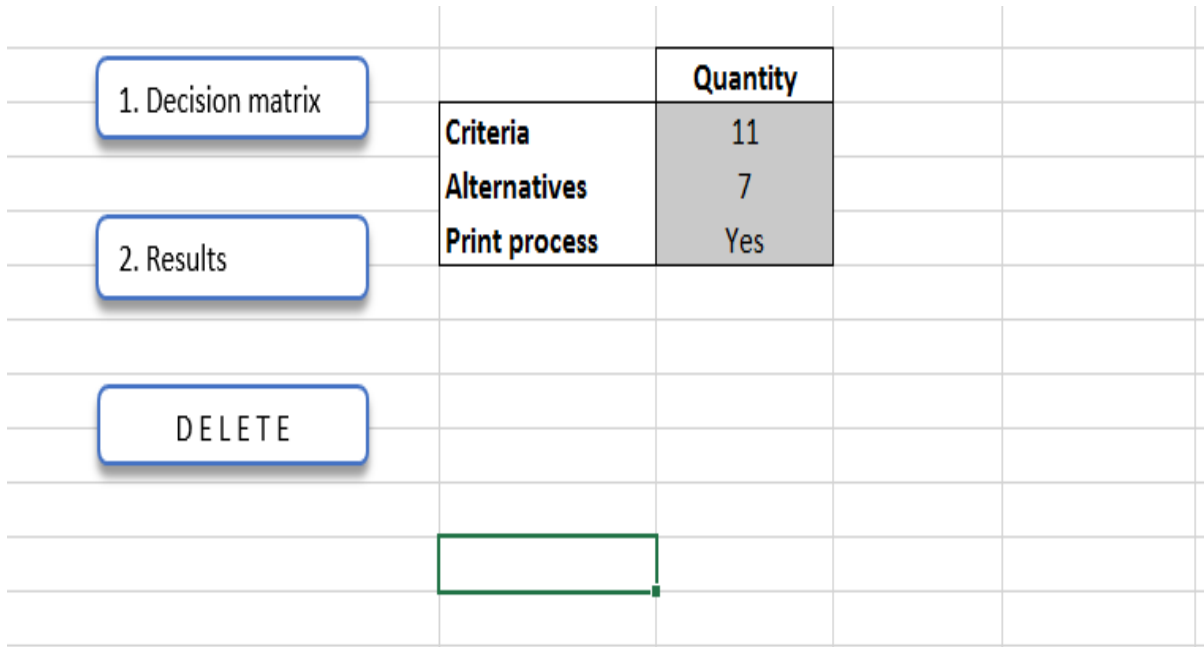


Figura 5.4 Interfaz inicial técnica TOPSIS

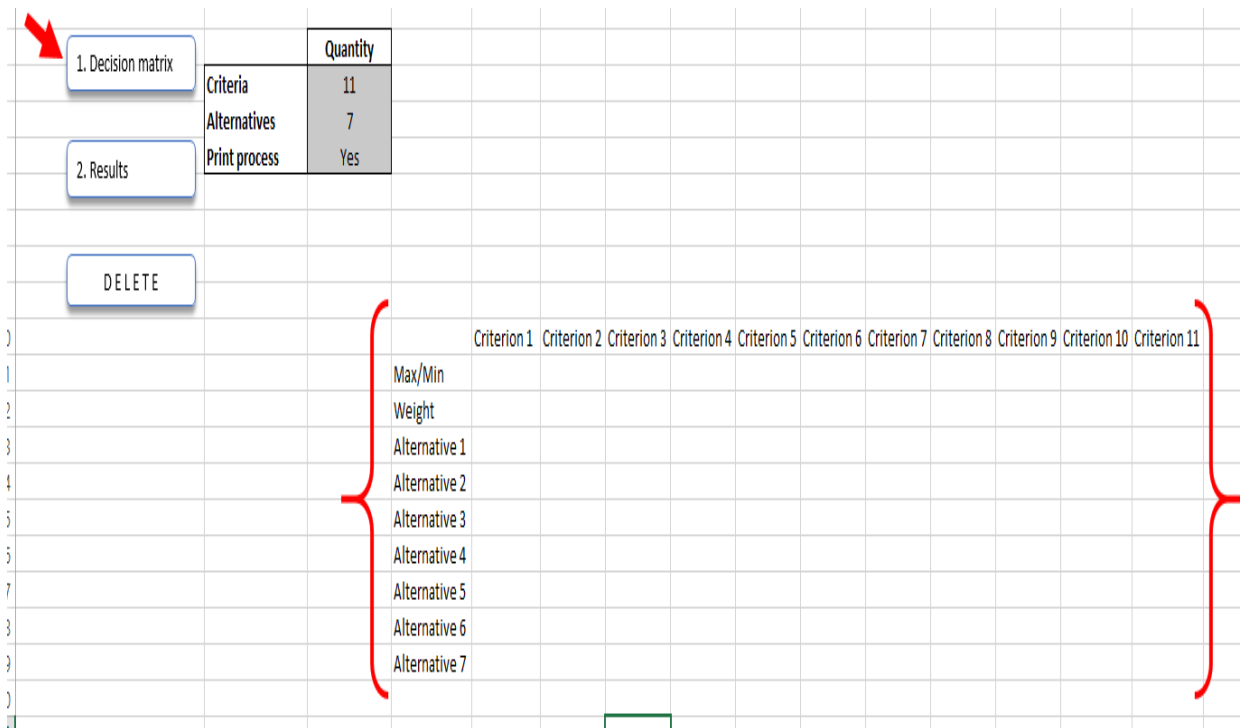


Figura 5.5 Matriz de Decisión para ingreso de valores

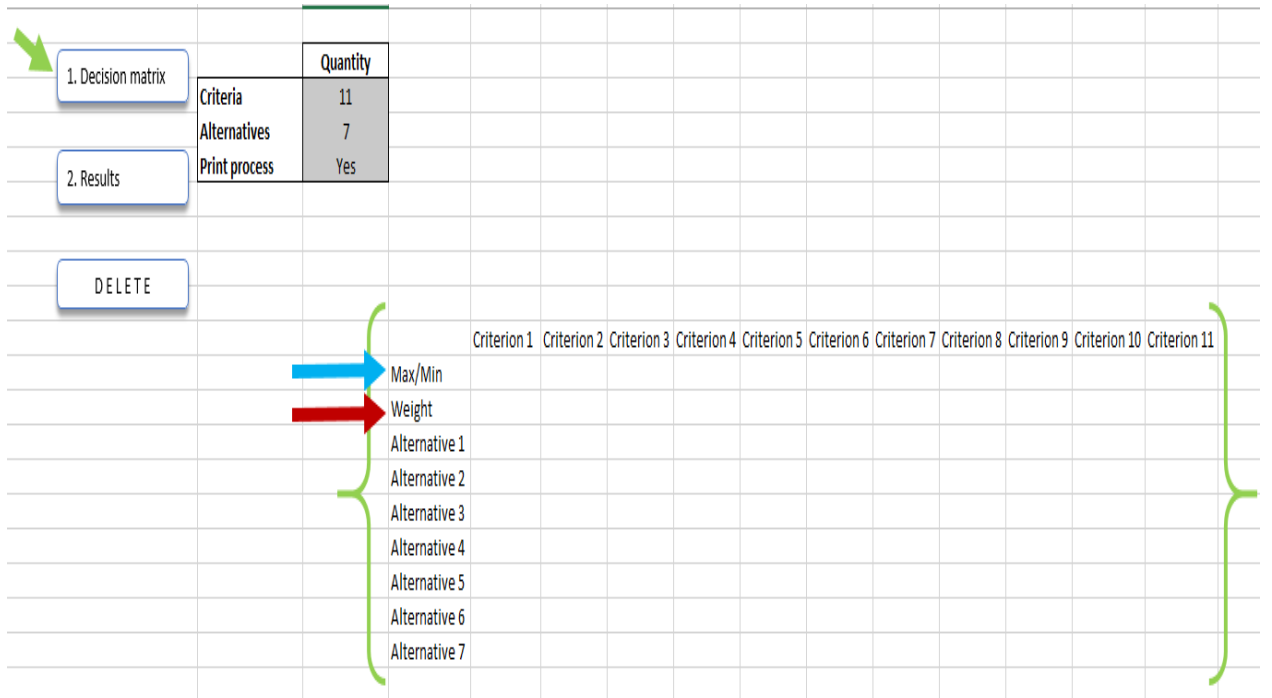


Figura 5.6 Elección de Max-Min y Ponderaciones

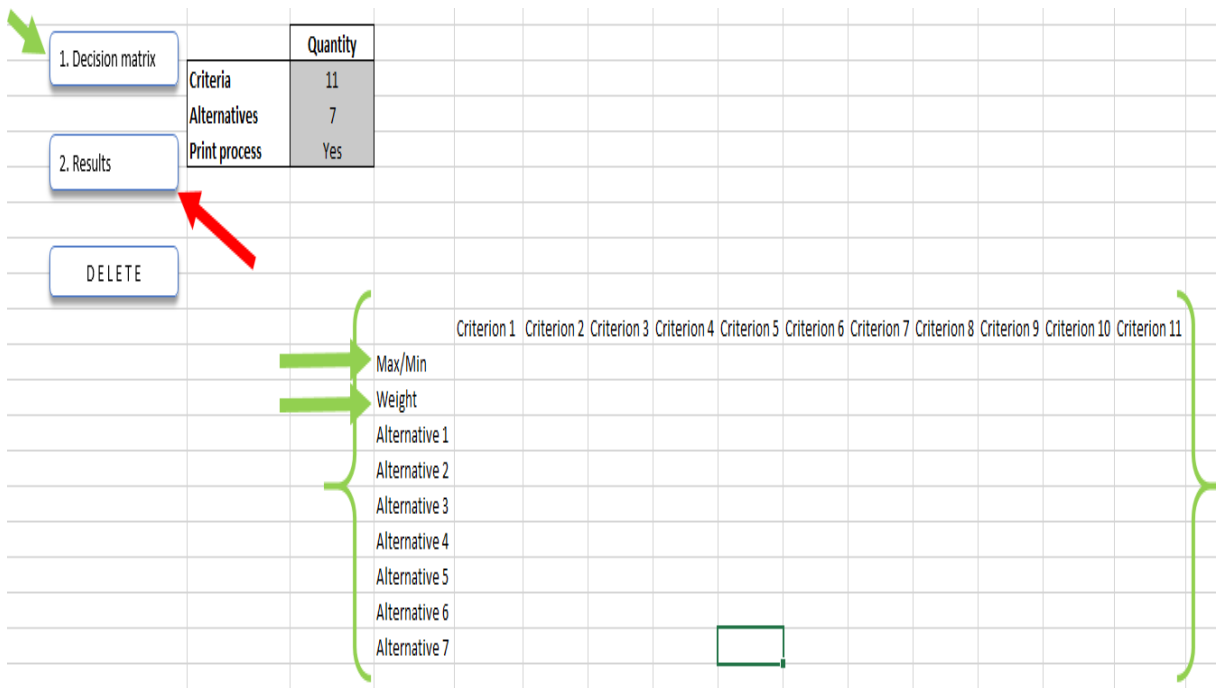


Figura 5.7 Resultados y ranking de alternativas

CAPÍTULO 6 . DISCUSIÓN

6.1 Caso de estudio 1

Para comenzar, la primera técnica utilizada es AHP. El primer escenario tiene tendencia al equilibrio, es decir la sostenibilidad de la biorrefinería. Por lo tanto, en la comparación de criterios esto se ve reflejado (ver Tabla 5.2) con la asignación del valor dos. Este valor no es arbitrario, puesto que, debido al funcionamiento de la técnica, al añadirse dentro de la matriz encima de la diagonal principal valores mayores al mencionado, el índice de concordancia se ve afectado. El resultado final (ver Tabla 5.6) muestra en la primera columna correspondiente a “Sustentable”, que los primeros tres lugares conciernen a los ecodiseños *IBP-2*, *BPP* y *BPP-D*. De acuerdo con la información del CE1, el ecodiseño *IBP-2* contiene un mayor número de plataformas para la producción de biodiesel, bio-carbón, bio-aceite y glicerina a partir de la biomasa de *Jatropha Curcas*. Aprovechando así, la biomasa para un mayor espectro de productos. Por otro lado, los ecodiseños *BPP* y *BPP-D*, son de una y dos plataformas respectivamente, usando como insumo aceite y biomasa de *Jatropha Curcas* para la producción de biodiesel, calor y energía, reduciendo los coproductos. Continúa el escenario con tendencia ambiental, donde los criterios asociados a ésta son favorecidos con un mayor número de la escala de jerarquización de Saaty (ver Tabla 2.3). En esta misma evaluación, en la comparación con criterios económicos y sociales, se beneficia con un número muy alto a la tendencia ambiental (

Tabla 5.3). Los resultados se muestran en la columna con el nombre asociado (ver Tabla 5.6), donde los tres ecodiseños favorecidos son *IBP-2*, *IBP-1* y *BPP-D*. Para este escenario con tendencia ambiental, los tres resultados usan como insumo biomasa. Sin embargo, difieren en la cantidad de plataformas para la producción de distintos productos, iniciando con cuatro, cinco y dos respectivamente. El siguiente escenario evaluado posee tendencia económica, aventajando con una mayor calificación de la escala de Saaty a los criterios asociados a esta preferencia (ver Tabla 5.4). Tal como en los escenarios previos, el ranking obtenido favorece a los ecodiseños *IBP-2*, *IBP-1* y *BPP*. Las posiciones uno y dos coinciden con el escenario ambiental, distinta a la tercera que es el escenario base cuyo insumo es el aceite de *Jatropha Curcas*. El último escenario corresponde al pilar social (ver Tabla 5.5). En el CE1, el impacto social es beneficiado por los trabajos creados para la construcción de la biorrefinería, así como para la manipulación de los procesos internos. Al igual que los escenarios previos, es llevado a cabo el desarrollo de la técnica con la comparación favoreciendo los dos criterios sociales (EE y NCDI). El resultado de la evaluación favorece a los ecodiseños *BPP*, *IBP-2* y *BPP-A* en la cuarta columna del ranking. Como resultado concluyente de esta técnica, en tres de los cuatro escenarios evaluados el primer puesto es ocupado por el ecodiseño *IBP-2*, variando en la segunda posición *IBP-1* o *BPP*. Esto permite fundamentar la elección realizada en el estudio original como válida, con ayuda de la aplicación de esta técnica. Cabe mencionar que, las plataformas mencionadas en cada ecodiseño se refieren a la cantidad de procesos y configuraciones consideradas para la producción de biodiesel y coproductos. Motivo por el cuál un ecodiseño puede considerarse mejor que otro.

La segunda técnica es *F-AHP* con funcionamiento similar a su predecesora. Esta cuenta con la característica del uso de números triangulares difusos para la reducción de incertidumbre asociada a la subjetividad de la técnica. Inicia el escenario sustentable, manteniendo el equilibrio en los pesos de importancia asignados (ver

Tabla 5.7). Los cálculos de la técnica son llevados a cabo, finalizando con el ranking (ver Tabla 5.11). Para este escenario resultan *IBP-2*, *BPP* y *BPP-A*. Para

CRITERIA	BVP	RMC	FRF	MGM	NRES	WR	RCR	SLU	RBE
BVP	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2
RMC	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2
FRF	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2
MGM	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2
NRES	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2
WR	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2 3	1 2
RCR	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2 3	1 2
SLU	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1 1	1 2
RBE	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1 1
EE	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2
NCDI	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2 1	1/3 1/2

el escenario ambiental, los criterios con esta tendencia mantienen igualdad en las comparaciones, a diferencia de las comparaciones entre criterios ambientales contra criterios económicos y sociales, donde se beneficia con números triangulares altos (ver Tabla 5.8). Después de realizar los pasos de la técnica se obtiene el ranking mostrado en la columna que coincide con el nombre del escenario (ver Tabla 5.11), cuyos primeros tres lugares son *IBP-2*, *BPP-D* e *IBP-1*. El siguiente escenario corresponde al pilar económico, favoreciendo totalmente a aquellos criterios que benefician a este rubro. Los valores que resultan de la comparación jerárquica están en la Tabla 5.9. Posterior a los cálculos de la técnica, el ranking resultante (ver Tabla 5.11) posiciona a los primeros tres lugares: *IBP-2*, *IBP-1* y *BPP*. Para el último escenario con orientación social, cuyas comparaciones respecto al resto de los criterios beneficia con ayuda de los números triangulares inversos más altos (debido al procedimiento de la técnica) (ver

Tabla 5.10). Los resultados de los primeros tres puestos son *IBP-2*, *BPP* e *IBP-1* (ver Tabla 5.11). Es posible apreciar que existe concordancia de los resultados obtenidos en el escenario sustentable para esta técnica y AHP.

Como se menciona con anterioridad, para la técnica *TOPSIS* es necesario utilizar los datos originales del caso de estudio sin considerar las unidades de medida para cada criterio (ver Tabla 5.12). Para el escenario sustentable, se considera en la fila del mismo nombre, valores iguales 0.09 para mantener el equilibrio, y que la suma de las ponderaciones sea igual a uno. Después de los cálculos pertinentes, se obtiene el ranking donde los ecodiseños *IBP-2*, *IBP-1* y *BPP-D* ocupan los primeros tres puestos (ver Tabla 5.13). Tal como el primer escenario, después de llevar a cabo los cálculos de la técnica, son determinados los pesos para aquellos criterios con tendencia ambiental, donde se asigna el valor igual a 0.15 para estos criterios, dejando al aspecto económico y social con 0.02 (ver Tabla 5.12). Tal como el escenario previo, las posiciones del ranking coinciden en las primeras posiciones *IBP-2*, *IBP-1* y *BPP-D* (ver Tabla 5.13). Para el escenario económico, se favorecieron dos criterios con la ponderación igual a 0.3, manteniendo el resto de los criterios con valores más bajos. El ranking coincide en posiciones tal como los dos escenarios previos (ver Tabla 5.13). En el último escenario enfocado a resaltar el pilar social, son asignados los pesos igual a 0.4 para los dos criterios finales (EE y NCDI) que favorecen esta tendencia (ver Tabla 5.12). De forma similar a los escenarios previos, el ranking coincide con las primeras tres posiciones. En el gráfico (ver Figura 5.1) se aprecian las posiciones de cada una de las alternativas para cada uno de los escenarios. Es importante resaltar que la alternativa óptima será aquella que guarde una distancia mínima positiva con la solución ideal (sobre el eje de abscisa), así como la que tenga una máxima distancia negativa a la solución idea negativa (eje de las ordenadas). Para la técnica *MTOPSIS* es necesario utilizar los datos originales del CE1 sin considerar las unidades de medida. El orden de los escenarios evaluados continúa como las técnicas previas. Comenzando por el sostenible (ver Tabla 5.14), con la fila del mismo nombre es asignada la ponderación igual a uno para todos los criterios, buscando el equilibrio. Posterior a los cálculos de la técnica, se obtiene el ranking donde los ecodiseños

IBP-2, IBP-1 y BPP-D ocupan los primeros tres puestos (ver Tabla 5.15). Para los siguientes escenarios las ponderaciones más altas están relacionadas a la tendencia seguida en cada uno. Es importante mencionar que hay coincidencia en el orden del ranking en cada escenario (ambiental, económico, social) con el sostenible. Como se aprecia en la Figura 5.2 el punto (min (Di+), máx. (Di-)) refleja la zona ideal de referencia. Para esta técnica, la alternativa óptima será aquella que tenga el valor más bajo en Di+ y el valor más grande en Di-. Para el caso de los escenarios Sustentable, ambiental y económico lo posee el ecodiseño IBP-2.

6.2 Caso de estudio 2

Iniciando con la técnica F-AHP, el primer escenario evaluado es el sustentable. Los números triangulares permanecen iguales en la comparación de criterios (ver Tabla 5.17) Los cálculos de la técnica son realizados, finalizando con el ranking (ver Tabla 5.20), donde en la columna con el mismo nombre, los ecodiseños B3, B1 y B5 ocupan las primeras posiciones. En la evaluación del escenario ambiental, resaltan los números triangulares altos en las comparaciones hechas a los criterios NER, Co e Ingreso Neto. Esto se debe al funcionamiento de las matrices en la técnica, donde las filas tienen preferencia a las columnas. Por lo tanto, las altas calificaciones corresponden a la tendencia ambiental (ver Tabla 5.18). Como resultado del funcionamiento de la técnica, el ranking sitúa a los ecodiseños B3, B1 y B5 en las primeras posiciones. Este resultado coincide con el escenario sustentable, puesto que los criterios ambientales sobrepasan en considerable número a los relacionados con la economía (ver Tabla 5.20). Para el escenario económico (ver

CRITERIA	ADP			AP			EP			GWP			ODP			HTP			FWEP			MWEF			TEP			POP			NER		
ADP	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	19	1/7	1
AP	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
EP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
GWP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
ODP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
HTP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
FWEP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
MWEF	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1/9	1/7	1
TEP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1/9	1/7	1

POP	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	1/9	1/7	1	
NER	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	1	1		
Co	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7		
INGRESO NETO	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7		

), destacan las ponderaciones invertidas con denominador mayor en los criterios NER, Co e Ingreso Neto. Esto debido al funcionamiento de la técnica como se explica anteriormente. Termina con el ranking donde los tres primeros ecodiseños son B1, B3 y B5. En conclusión, para esta técnica los ecodiseños B1, B3 y B5 fueron repetitivos en los resultados de las evaluaciones. Sin embargo, las coincidencias en el orden se presentaron únicamente en los escenarios sustentable y ambiental. La aplicación de la técnica *M-TOPSIS* parte del conjunto de datos asociados al CE2 (ver Tabla 5.21) Se realizan los cálculos necesarios para que los datos carezcan de unidad de medida. Comenzando con el escenario sostenible, cuyas ponderaciones son igual a 0.77, puesto que en este escenario ningún criterio es más importante que otro y la suma de las ponderaciones debe ser igual a uno (ver Tabla 5.22). Posterior a los cálculos de la técnica, el resultado muestra que los ecodiseños B1, B2 y B3 ocupan los primeros tres puestos (ver Tabla 5.23). Es importante mencionar que esta técnica busca la proximidad relativa a la solución ideal, cercana a 0 (ver Figura 5.3). Para los siguientes escenarios las ponderaciones más altas están relacionadas a la tendencia seguida en cada uno: ambiental y económico. Para el escenario ambiental, las ponderaciones se asignaron con 80% dividido entre los diez criterios ambientales y 20% entre los tres criterios económicamente orientados (ver Tabla 5.22). Los primeros tres lugares del ranking (ver Tabla 5.23) corresponden a los ecodiseños B1, B3 y B2, cuyas posiciones se encuentran más cercanas al 0 tal como en la Figura 5.3. Por otro lado, en la evaluación del escenario económico se estableció 80% para los tres criterios NER, Co e Ingreso Neto, aplicando el 20% para los diez restantes. El ranking resultante fue igual a los dos escenarios evaluados previamente. En la Figura 5.3 se aprecia la ubicación de cada alternativa de ecodiseño en los distintos escenarios evaluados.

Se recomienda que para la aplicación de la técnica AHP, se conjunte un panel de expertos, en el cual su conocimiento sea aplicado en la asignación de pesos. Esto se menciona puesto que para los casos de estudio, los pesos fueron asignados de acuerdo con lo considerado por la autora de este trabajo terminal. También de igual manera Se invita de igual manera, a un consenso para la aplicación de la técnica F-AHP, donde la subjetividad puede disminuir con la ayuda de la opinión de los diferentes participantes del panel de expertos. Es importante mencionar que, respecto a las alternativas de ecodiseño presentadas en los casos de estudio, cada una posee características distintas de acuerdo con las configuraciones de procesos para la producción de biodiesel. Si alguno de estos casos de estudio se presentase para inversión, los escenarios económicos serían relevantes para la toma de decisión, más allá de la parte sostenible.

CAPÍTULO 7 . CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados para este trabajo y comparando los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta en los casos de estudio uno y dos, es posible fundamentar la selección de los ecodiseños óptimos respecto a las respuestas obtenidas en los estudios originales. Esto es debido a que existe coincidencia entre los rankings de las técnicas seleccionadas y evaluadas, con la selección del ecodiseño elegido en los casos de estudio.

Los casos de estudio seleccionados como representativos son investigaciones relevantes que con ayuda de la metodología diseñada pueden fundamentar la selección de ecodiseños óptimos para la producción de biodiesel. La aplicación valida el proceso de la metodología diseñada para la selección del ecodiseño óptimo para las biorrefinerías propuestas en los CE1 y CE2. Por lo tanto, puede convertirse en una aportación provechosa como propuesta inicial para un marco metodológico en sustentabilidad de biorrefinerías, con posibles aplicaciones diversas en otras áreas que enfrenten problemáticas similares respecto al análisis de decisión multicriterio. Asimismo, cabe mencionar que existe flexibilidad dentro de la metodología diseñada para la seleccionar y aplicar otras técnicas de MCDM, de acuerdo con el juicio del decisor o analista.

Además, el procesamiento de datos mediante las hojas de cálculo permite al DM reducir el tiempo invertido para la toma de decisión, una vez que éste tenga a su alcance la información necesaria para el llenado de la matriz de decisión.

Referencias

- Adekunle, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2016). Lignocellulosic bioethanol: A review and design conceptualization study of production from cassava peels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *64*, 518–530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.064>
- AgencialD. (2018). En México, la primera biorrefinería de cuarta generación. *La Capital*. Recuperado de https://www.lacapital.com.mx/noticia/61249-En_Mexico_la_primera_biorrefineria_de_cuarta_generacion?platform=hootsuite
- Ahmad, N., Kasim, M. M., & Shanmugam, K. R. S. (2019). Comparative analysis of crisp and fuzzy multi- Criteria Decision Making methods for supplier selection in an automotive manufacturing industry. *International Journal of Supply Chain Management*, *8*(1), 951–957.
- Akdere, M. (2011). An analysis of decision-making process in organizations: Implications for quality management and systematic practiceNo Title. *Totally Quality Management & Business Excellence*, *22*(12), 14. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14783363.2011.625180?scroll=top&needAccess=true>
- Aldecoa, J. (2016). Proyectan la primera biorrefinería en México. Recuperado el 21 de noviembre de 2018, de CONACYT Agencia Informativa website: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/10296-proyectan-la-primera-biorrefineria-en-mexico>
- Alfaro-Barbosa, J. M., Limón-Rodríguez, B., & Martínez-Turanzas, G. A. (2014). *Ambiente y Sustentabilidad: Por una educación ambiental*. Grupo Editorial Patria.
- Allione, C., De Giorgi, C., Lerma, B., & Petruccelli, L. (2012). From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. *Energy*, *39*(1), 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.055>

- Aranda-Usón, A., & Zabalza-Bribián, I. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida* (1ra Edició). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Aresta, M., Dibenedetto, A., & Dumeignil, F. (2015). *Biorefineries: An Introduction*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Aruldoss, M. (2013). A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), 31–43. <https://doi.org/10.12691/ajis-1-1-5>
- Ayhan, M. B. (2013). A Fuzzy Ahp Approach For Supplier Selection Problem: A Case Study In A Gearmotor Company. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*, 4(3), 11–23. <https://doi.org/10.5121/ijmvsc.2013.4302>
- Bacon, F. (2015). University Baltimore. Recuperado el 13 de junio de 2018, de Tools for Decision Analysis: Analysis of Risky Decisions website: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/Business-stat/opre/partIX.htm#rwida>
- Báez, C. (2017). Retos y oportunidades de la biorrefinería en México. Recuperado el 21 de noviembre de 2018, de CONACYT Agencia Informativa website: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/15937-retos-oportunidades-biorrefineria-mexico>
- Baker, D., Bridges, D., Hunter, R., Johnson, G., Krupa, J., Murphy, J., & Sorenson, K. (2002). *GUIDEBOOK TO DECISION-MAKING METHODS*. NASA.
- Belton, V., & Stewart, T. (2010). Problem Structuring and Multiple Criteria Decision Analysis. En M. Ehrgott, J. R. Figueira, & S. Greco (Eds.), *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 209–239). Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-5904-1_8
- Biofuel Org. (2010). Biofuel.org.uk. Recuperado el 30 de mayo de 2018, de Biofuels: What are they? website: <http://biofuel.org.uk>
- Boufateh, I., Perwuelz, A., Rabenasolo, B., & Jolly, A. (2012). *Multiple Criteria Decision Making for environmental impacts optimization To cite this version : Anne-Marie Jolly-Desodt.*

- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Bushan, N., & Rai, K. (2004). Strategic decision making. Applying the analytic hierarchy process. *Applying the Analytic Hierarchy Process*. Springer London.
- Büyüközkan, G., Çifçi, G., & Güteryüz, S. (2011). Strategic analysis of healthcare service quality using fuzzy AHP methodology. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9407–9424. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.103>
- Celebi, A. D., Ensinas, A. V., Sharma, S., & Maréchal, F. (2017). Early-stage decision making approach for the selection of optimally integrated biorefinery processes. *Energy*, 137, 908–916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.080>
- Chou, S., & Chang, Y. (2008). The Implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits. *Decision Support Systems*, 46, 149–157.
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Cuevas-Castillo, G. A. (2017). *Evaluación Tecno-económica y análisis de ciclo de vida de una biorrefinería de biomasa microalgal*. UADY.
- Demirbas, A. (2009). *Biorefineries: for Biomass Upgrading Facilities*. Springer Science & Business Media.
- Denac, M., Obrecht, M., & Radonjič, G. (2018). Current and potential ecodesign integration in small and medium enterprises: Construction and related industries. *Business Strategy and the Environment*, 27(7), 825–837. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.2034>
- Deutz, P., McGuire, M., & Neighbour, G. (2013). Eco-design practice in the context of a structured design process: An interdisciplinary empirical study of UK manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, 39, 117–128.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.035>

- Díaz-Balteiro, L., González-Pachón, J., & Romero, C. (2017). Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 258(2), 607–616. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.075>
- Fernández-García, R. (2011). *La dimensión económica del desarrollo sostenible*. Club Universitario.
- Fernando, S., Adhikari, S., Chandrapal, C., & Murali, N. (2006). Biorefineries: Current Status, Challenges, and Future Direction. *Energy Fuels*, 20(4), 1727–1737.
- Foulet, A., Bouchez, T., Quemener, E. D. Le, Aissani, L., Foulet, A., Bouchez, T., ... Eco-design, L. A. (2017). *Eco-design of an innovative environmental biorefinery to produce added value chemicals from waste* To cite this version : HAL Id : hal-01463159.
- Gachet-Otáñez, I. F. (2002). *La huella ecológica: teoría, método y tres aplicaciones al análisis económico*. Editorial Abya Yala.
- Gal, T. (1980). Multiple Objective Decision Making — methods and applications. A state-of-the-art survey. *Eur. J. Oper. Res.*, 4(4), 287–288.
- Huang, L. C., & Wu, R. Y. H. (2005). Applying fuzzy analytic hierarchy process in the managerial talent assessment model – an empirical study in Taiwan's semiconductor industry. *International Journal of Technology Management*, 30(1–2), 105–130.
- Hwang, C. L., & Masud, A. S. M. (2012). *Multiple Objective Decision Making- Methods and Applications*. New York: Springer Science & Business Media.
- Hwang, C. L., & Yoon., K. (1981). Multiple attribute decision making, methods and applications. *Springer-Verlag*, 186.
- Ioannou, Konstantinos; Lefakis, P., & Arabatzi, G. (2011). Development of a decision support system for the study of an area after the occurrence of forest fire.

International Journal of Sustainable Society (IJSSOC), 3(1).

- Ishizaka, A., & Siraj, S. (2018). Are multi-criteria decision-making tools useful? An experimental comparative study of three methods. *European Journal of Operational Research*, 264(2), 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.041>
- Jahan, A., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., & Mustapha, F. (2010). Material screening and choosing methods - A review. *Materials and Design*, 31(2), 696–705. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.013>
- Julio, R., Albet, J., Vialle, C., Vaca-Garcia, C., & Sablayrolles, C. (2017). Sustainable design of biorefinery processes: existing practices and new methodology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(2), 373–395. <https://doi.org/10.1002/bbb.1749>
- K. Patil, S. (2013). Ranking the barriers of knowledge management adoption in supply chain using fuzzy AHP method. En *International Journal of Business Innovation and Research* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1504/IJBIR.2014.058047>
- Kaplan, D. M. (2017). Ecodesign in the Era of Symbolic Consumption. En *Philosophy, Technology, and the Environment*. MITP.
- Karen, D. C. (2015). La toma de decisiones de la empresa. En *Sistema de información para la toma de decisiones*. Recuperado de <http://www4.ujaen.es/~cruiz/diplot-5.pdf>
- Kilincici, O., & Onal, S. A. (2011). Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9656–9664. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.159>
- Knight, P., & Jenkins, J. O. (2009). Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of Cleaner Production*, 17(5), 549–558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.10.002>
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

- 69(November 2016), 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- Kumar, R. R., & Kumar, C. (2017). Designing an efficient methodology based on Entropy-TOPSIS for evaluating efficiency of cloud services. *ACM International Conference Proceeding Series, Part F1331*. <https://doi.org/10.1145/3154979.3154982>
- Lee, C. K., Lee, J. Y., Choi, Y. H., & Lee, K. M. (2016). Application of the integrated ecodesign method using the GHG emission as a single indicator and its GHG recyclability. *Journal of Cleaner Production, 112*, 1692–1699. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.081>
- Ley, R. (2002). Introducción al Análisis de Decisiones. Recuperado el 21 de mayo de 2018, de [http://www.decidir.org/RLey-ConfPr01 Introd.AD.pdf](http://www.decidir.org/RLey-ConfPr01%20Introd.AD.pdf)
- Liang, W., Zhao, G., & Wu, H. (2017). Evaluating Investment Risks of Metallic Mines Using an Extended TOPSIS Method with Linguistic Neutrosophic Numbers. *Infinity Study, 18*.
- Lurralde, A., Etxebitzta, E., & Ingurugiro, S. (2000). *Manual práctico de ecodiseño* (p. 182). p. 182. Recuperado de <http://www.valledelcauca.gov.co/agricultura/descargar.php?id=1756>
- Majumder, M. (2015). Multi Criteria Decision Making. En *Impact of Urbanization on Water Shortage in Face of Climatic Aberrations* (pp. 35–48). <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-73-3>
- Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications, 42*(8), 4126–4148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003>
- Marttunen, M., Lienert, J., & Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research, 263*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>
- Meixner, O. (2009). Fuzzy AHP group decision analysis and its application for the

evaluation of energy sources. *Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process, Pittsburgh, PA, USA*.
<https://doi.org/10.1.1.515.1368>

Merschak, S., & Hehenberger, P. (2019). Ecodesign Methods for Mechatronic Systems: A Literature Review and Classification. *20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 1–8.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/REM.2019.8744105>

Michelotti-Díaz, G., & García, E. (2016). Metodo Topsis aplicado a la selección de bombas de proceso para la industria química. *Facultad Regional Córdoba-Universidad Tecnológica Nacional*.

Mohindru, P. (2011). *MCDM Methods INTRODUCTION*. (Mcdm).

Moncada B, J., Aristizábal M, V., & Cardona A, C. A. (2016). Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 122–134.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>

Moncada, J., El-Halwagi, M. M., & Cardona, C. A. (2013). Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. *Bioresource Technology*, 135, 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.137>

Morales-Mendoza, L. F., Azzaro-Pantel, C., Belaud, J.-P., & Ouattara, A. (2017). Coupling life cycle assessment with process simulation for ecodesign of chemical processes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(2).
<https://doi.org/10.1002/ep.12723>

Murgante, B., Salmani, M., Qelichi, M. M., & Hajilo, M. (2017). A multiple criteria decision-making approach to evaluate the sustainability indicators in the villagers' lives in Iran with emphasis on earthquake hazard: A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/su9081491>

Naciones Unidas, . (2015). La Agenda de Desarrollo Sostenible. Recuperado el 26 de febrero de 2018, de Sustainable Development website:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

- Ng, R. T. L., & Maravelias, C. T. (2016). Design of Cellulosic Ethanol Supply Chains with Regional Depots. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(12), 3420–3432. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03677>
- Novák, V., Perfilieva, I., & Dvořák, A. (2016). *Insight into Fuzzy Modeling*. <https://doi.org/10.1002/9781119193210>
- Obrecht, M. (2019). Integrating Life Cycle Thinking, Ecolabels and Ecodesign Principles into Supply Chain Management. En *Integration of Information Flow for Greening Supply Chain Management*. (pp. 219–249). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-24355-5_13
- Özcan, T., Elebi, N., & Esnaf, A. (2011). Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9773–9779. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.022>
- Peters, M. S. ., & Timmerhaus, K. D. (2002). *Plant design and economics for chemical engineers*. United States of America: McGraw-Hill.
- Pineda-Navarro, F. S. (2016). *Design and Assessment of a Whole-crop Biorefinery based on Jatropha curcas using Sustainability criteria*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Platcheck, E. R., Schaeffer, L., Kindlein, W., & Cândido, L. H. A. (2008). Methodology of ecodesign for the development of more sustainable electro-electronic equipments. *Journal of Cleaner Production*, 16(1), 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.10.006>
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Quaddus, M. A., Abu, M., & Siddique, B. (2011). *Handbook of Corporate Sustainability: Frameworks, Strategies and Tools*. Edward Elgar Publishing.
- Quintero-Bermudez, M. A., Janssen, M., Cohen, J., & Stuart, P. (2014). *Early design-stage biorefinery process selection*, *TAPPI JOURNAL* November 2012.

(December).

- Real y Vásquez, A., & Maldonado-Macías, A. (2011). Selección De Fresadoras Con Topsis Usando Ponderaciones de AHP. *Culcyt*, (45), 95–102.
- Ree, R. Van, & Zeeland, A. Van. (2014). Sustainable and synergetic processing of biomass into marketable food & feed ingredients, chemicals, materials and energy (fuels, power, heat). *IEA Bioenergy, Task42 Biorefinery*, 66. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(07\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(07)00064-5)
- REMICA. (2018). Ecodiseño: ¿Cómo influye la normativa en las instalaciones de biomasa? Recuperado el 20 de noviembre de 2018, de <https://remicaatencionalcliente.es/ecodisenonormativa-biomasa/>
- Ren, J., Xu, D., Cao, H., Wei, S., Dong, L., & Goodsite, M. E. (2016). Sustainability Decision Support Framework for Industrial System Prioritization. *AIChE*, 62, 108–130. <https://doi.org/10.1002/aic>
- Ren, L., Zhang, Y., Wang, Y., & Sun, Z. (2010). Comparative Analysis of a Novel M-TOPSIS Method and TOPSIS. *Applied Mathematics Research eXpress*, 2007, 1–10. <https://doi.org/10.1093/amrx/abm005>
- Ren, Lifeng, Zhang, Y., Wang, Y., & Sun, Z. (2007). Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and topsis. *Applied Mathematics Research eXpress*, 2007, 1–10. <https://doi.org/10.1093/amrx/abm005>
- Rios, L. S., Ortiz, A. T., Colomo, R. A., Babey, M., Gonzalez, B. G., & Nieves, D. C. (2016). *Sistema Híbrido AHP-Fuzzy Logic , para Toma de Decisiones en Entornos de Incertidumbre . Aplicación a FMA*. (May), 2–3.
- Rivarola, S. (2012). *Desarrollo Sustentable: Una Sociedad Solidaria*. Grao.
- Román del Valle, M. A. (2017). *Diseño óptimo de empaque y embalaje bajo aspectos funcionales y medioambientales a bajo coste para una empresa hortofrutícola de limón persa*. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Roszkowska, E. (2011). Multi-Criteria Decision Making Models by applying the TOPSIS Method to crisp and interval data. *Multiple Criteria Decision Making*,

- 6(Mcdm), 200–230. Recuperado de <http://www.mcdm.ue.katowice.pl/index.php?page=publications&id=Rosz11>
- Rousseau, G. (2019). Ecodesign for warships. *OCEANS 2019 - Marseille*, 1–9. <https://doi.org/doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867493>
- Ruiz, J. (2015). *Métodos De Decisión Multicriterio Electre Y Topsis Aplicados a La Elección De Un Dispositivo Móvil*. 116.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw Hill.
- Sabaei, D., Erkoyuncu, J., & Roy, R. (2015). A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery. *Procedia CIRP*, 37, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.086>
- Sacramento-Rivero, J. C. (2012). A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6, 32–44. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Sacramento-Rivero, J. C., Romero, G., Cortés-Rodríguez, E., Pech, E., & Blanco-Rosete, S. (2010). DIAGNOSTICO DEL DESARROLLO DE BIORREFINERIAS EN MEXICO. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 261–283. Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+DIAGNOSTIC+STUDY+ON+THE+DEVELOPMENT+OF+BIOREFINERIES+in+mexico#0>
- Sadhukhan, J., Siew Ng, K., & Martinez-Hernandez, E. (2014). *Biorefineries and Chemical Processes: Design, Integration and Sustainability Analysis*. John Wiley & Sons.
- Sakthivel, G., Ilangkumaran, M., & Gaikwad, A. (2014). A hybrid multi-criteria decision modeling approach for the best biodiesel blend selection based on ANP-TOPSIS analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 239–256. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.08.003>
- San Cristóbal Mateo, J. R. (2012). *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry*. 7–11. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2346-0>

- Sanaei, S. (2014). *Sustainability Assessment of Biorefinery Strategies Under Uncertainty and Risk Using Multi-Criteria Decision-Making (Mcdm) Approach.* (Mcdm).
- Santolaria, M., Oliver-Sol, J., Gasol, C. M., Morales-Pinzón, T., & Rieradevall, J. (2011). Eco-design in innovation driven companies: Perception, predictions and the main drivers of integration. the Spanish example. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1315–1323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.009>
- Santos, P. A. (2001). Sustainable Innovation: ecodesign applied to the design of new products. *University of Caxias do Sul*.
- Short, T., Lee-Mortimer, A., Luttrupp, C., & Johansson, G. (2012). Manufacturing, sustainability, ecodesign and risk: Lessons learned from a study of Swedish and English companies. *Journal of Cleaner Production*, 37, 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.037>
- Sovacool, B. K. (2012). Design principles for renewable energy programs in developing countries. *Energy & Environmental Science*, 5(11), 9157. <https://doi.org/10.1039/c2ee22468b>
- Stibel, J. (2014). 7 Steps To Effective Decision Making. Recuperado el 18 de junio de 2018, de World Economic Forum website: https://agenda.weforum.org/2014/11/7-steps-to-effective-communication/?utm_content=buffer42030&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer
- Taylor, G. (2008). Biofuels and the biorefinery concept. *Energy Policy*, 36(12), 4406–4409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.069>
- Turra, D. T. (2002). *Estudo das Diretrizes para a Reciclagem de Materiais e Produtos como Subsidio a Aplicacao do EcoDesign.* ULBRA.
- Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56–66. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12586-2>
- Verdejo-Andrés, E. (2010). Ecodiseño: hacia un envase más sostenible. *Packaging*.

Recuperado de <http://www.packaging.enfasis.com/articulos/16353-ecodisenoun-envase-mas-sostenible>

- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- Yu, X., Zhang, S., Liao, X., & Qi, X. (2018). ELECTRE methods in prioritized MCDM environment. *Information Sciences*, 424, 301–316. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.09.061>
- Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2), 103–111. <https://doi.org/10.1109/91.493904>
- Zahálka, J. ;, Bradáč, F. ., Tůma, J., & Synek, M. (2014). Assurance of functional safety in relation to ecodesign of machine tools. *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, 494–498. <https://doi.org/10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018309>

Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras de biodiesel

Por Luisa Andrea González Cruz

Selección del ecodiseño óptimo mediante el análisis de decisión multicriterio: biorrefinerías productoras de biodiesel

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	rtbioenergia.org.mx Internet	227 palabras — 1%
2	www.ingquimica.uady.mx Internet	207 palabras — 1%
3	riunet.upv.es Internet	106 palabras — < 1%
4	hdl.handle.net Internet	106 palabras — < 1%
5	docplayer.es Internet	104 palabras — < 1%
6	bibing.us.es Internet	70 palabras — < 1%
7	www.scribd.com Internet	48 palabras — < 1%
8	documentop.com Internet	46 palabras — < 1%
9	Mahsa Moghadas, Asad Asadzadeh, Athanasios Vafeidis, Alexander Fekete, Theo Kötter. "A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran", International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019 Crossref	43 palabras — < 1%

10	pt.scribd.com Internet	43 palabras — < 1%
11	es.scribd.com Internet	41 palabras — < 1%
12	documents.mx Internet	37 palabras — < 1%
13	playmedia.com.mx Internet	37 palabras — < 1%
14	www.bioeconomia.com.ar Internet	35 palabras — < 1%
15	creativecommons.org Internet	35 palabras — < 1%
16	repositorio.upct.es Internet	30 palabras — < 1%
17	www.scielo.org.mx Internet	29 palabras — < 1%
18	acceda.ulpgc.es Internet	28 palabras — < 1%
19	www.ihobe.es Internet	27 palabras — < 1%
20	wn.com Internet	22 palabras — < 1%
21	www.travel-ace.com Internet	21 palabras — < 1%
22	www.genesisclip.com Internet	21 palabras — < 1%
23	ROGELIO CARDENAS VARGAS. "Biorefinerías para la producción de biocombustibles de	20 palabras — < 1%

24	www.envapack.com Internet	19 palabras — < 1%
25	ruja.ujaen.es Internet	18 palabras — < 1%
26	www.theibfr.com Internet	17 palabras — < 1%
27	comunidadeditora.org Internet	17 palabras — < 1%
28	repositorio.tec.mx Internet	17 palabras — < 1%
29	www.quimica.uady.mx Internet	17 palabras — < 1%
30	www.raco.cat Internet	15 palabras — < 1%
31	www.lamolina.edu.pe Internet	14 palabras — < 1%
32	repositorio.unfv.edu.pe Internet	13 palabras — < 1%
33	Mohammad Sharif Karimi, Huseyin Karamelikli, Maryam Heidarian. "Impact of an economic development plan on regional disparities in Iran", Area Development and Policy, 2019 Crossref	12 palabras — < 1%
34	digital.csic.es Internet	12 palabras — < 1%
35	refbase-en.iuma.ulpgc.es Internet	11 palabras — < 1%

36	earthpeoples.org Internet	11 palabras — < 1%
37	www.it.uniovi.es Internet	11 palabras — < 1%
38	desoft03.usc.es Internet	11 palabras — < 1%
39	www.altec2013.org Internet	11 palabras — < 1%
40	www.slideshare.net Internet	11 palabras — < 1%
41	repositorio.unsm.edu.pe Internet	11 palabras — < 1%
42	www.izceas.org Internet	11 palabras — < 1%
43	wicc.it.itba.edu.ar Internet	10 palabras — < 1%
44	Vicente Calvo Peña. "Sistema experto para el análisis de la criticidad y seguridad en redes de galerías de servicios urbanas.", Universitat Politecnica de Valencia, 2015 Crossref Posted Content	10 palabras — < 1%
45	Li An, Daniel G. Brown. "Survival Analysis in Land Change Science: Integrating with GIScience to Address Temporal Complexities", Annals of the Association of American Geographers, 2008 Crossref	10 palabras — < 1%
46	www.bdigital.unal.edu.co Internet	10 palabras — < 1%
47	link.springer.com Internet	10 palabras — < 1%

48	www.unesco.org.cu Internet	9 palabras — < 1%
49	www.magfor.gob.ni Internet	9 palabras — < 1%
50	pdfs.semanticscholar.org Internet	9 palabras — < 1%
51	www.digitaliapublishing.com Internet	9 palabras — < 1%
52	docslide.us Internet	9 palabras — < 1%
53	repositorio.unac.edu.pe Internet	9 palabras — < 1%
54	" Spanish Abstracts Volume 21, Number 6 ", Journal of Industrial Ecology, 2017 Crossref	9 palabras — < 1%
55	LEONARDO ANDRES SIERRA VARELA. "EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA SOSTENIBILIDAD SOCIAL PARA EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURAS.", Universitat Politecnica de Valencia, 2017 Crossref Posted Content	9 palabras — < 1%
56	bdigital.unal.edu.co Internet	9 palabras — < 1%
57	JULIO CÉSAR RIVERA PEDROZA. "LA SOSTENIBILIDAD EN EL DISEÑO SISTÉMICO Un enfoque conceptual para el desarrollo de productos y servicios sostenibles", Universitat Politecnica de Valencia, 2017 Crossref Posted Content	9 palabras — < 1%
58	hera.ugr.es Internet	9 palabras — < 1%

59	www.sociedadpolimerica.org.mx Internet	9 palabras — < 1%
60	www.bde.es Internet	9 palabras — < 1%
61	www.unionfenosa.es Internet	9 palabras — < 1%
62	www2.uca.es Internet	9 palabras — < 1%
63	www.sela.org Internet	9 palabras — < 1%
64	www.tdx.cat Internet	9 palabras — < 1%
65	tesis.pucp.edu.pe Internet	9 palabras — < 1%
66	www.oficialia.gob.mx Internet	9 palabras — < 1%
67	acacia.org.mx Internet	9 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR
COINCIDENCIAS

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO