



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Selección de tratamientos químicos para recobro mejorado a partir de metodologías multicriterio

Cindy Alejandra Ortega Romero

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Ciencias de la computación y decisión
Medellín, Colombia
2019

Selección de tratamientos químicos para recobro mejorado a partir de metodologías multicriterio

Cindy Alejandra Ortega Romero

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Ingeniería de Sistemas

Directora:

PhD. Yris Olaya Morales

Codirector:

PhD. Juan Manuel Mejía Cárdenas

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Grupo de Investigación:

Dinámicas de flujo y transporte en medios porosos

Ciencias de la decisión

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2019

A Dios, a mi madre y mi hermanito Aníbal.

Son mi principal motivación en la vida. Gracias por su amor incondicional y apoyo.

“The path from dreams to success does exist. May you have the vision to find it, the courage to get on to it, and the perseverance to follow it.”

Kalpana Chawla

Agradecimientos

Gracias a Dios por este nuevo triunfo y las bendiciones recibidas a través de este trabajo de tesis, por ser el apoyo y fortaleza en los momentos de dificultad y debilidad.

Gracias a mi madre Carmen Romero por ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mí, es gracias a su amor, su coraje y gran esfuerzo que he logrado mis metas. Agradezco a mi padre Edilberto Ortega por anhelar siempre lo mejor para mi vida y por su apoyo incondicional. A mi hermanito Aníbal por iluminarme la vida y ser siempre mi motor. Gracias a mi familia por sus consejos.

Mediante estos agradecimientos quiero exaltar la labor de la docente Yris Olaya Morales, por estar presente durante todo el proceso de investigación y haber compartido sus conocimientos, por guiarme con su paciencia y rectitud. Su apoyo y motivación fueron la base para crecer como profesional y al mismo tiempo disfrutar de este proceso de aprendizaje. Las palabras no me alcanzan para expresarle toda mi gratitud.

Quiero agradecer al docente Juan Manuel Mejía por su apoyo, consejos y aportes en este trabajo, por compartir su experiencia profesional, orientándome así hacia el área de la investigación.

Gracias al Grupo de Investigación Dinámicas de flujo y transporte en medios porosos por aportar en mi desarrollo como profesional, y a todos los integrantes que me apoyaron en esta investigación, en especial a Juan David Valencia y Julián Martínez. A mis amigos y compañeros de estudio Christian Ortiz, Alberto Ceballos, Hillmert Solano y Andrés Morales, gracias por su tiempo y compartir su experiencia académica.

Agradezco a COLCIENCIAS, la ANH y la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA por su soporte a través del proyecto "Plan nacional para el potenciamiento de la tecnología CEOR con gas mejorado químicamente" contrato 273-2017.

Resumen

En este trabajo de investigación se presenta una metodología de decisión para respaldar la elección de tratamientos químicos para mejorar la recuperación de petróleo en un campo específico. El algoritmo de decisión propuesto combina el proceso analítico jerárquico (AHP), la lógica difusa (FL) y algoritmos genéticos (GA), para determinar la importancia relativa de los criterios y luego, con la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS) seleccionar la mejor alternativa.

Palabras clave: FAHP, TOPSIS, algoritmo genético, recobro mejorado, tratamiento químico.

Abstract

This research presents a decision methodology to select a chemical treatment for enhanced oil recovery in a specific field. The proposed decision algorithm combines Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy Logic (FL), and Genetic Algorithms (GA) for determining the relative importance of criteria, and then with the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to select the best alternative.

Keywords: FAHP, TOPSIS, genetic algorithm, enhanced oil recovery, chemical treatment.

Contenido

1. Recuperación terciaria o recobro mejorado de petróleo	7
1.1 Definición	7
1.2 Métodos de recobro mejorado.....	8
1.3 Etapas de un piloto recobro mejorado	9
2. Análisis de decisiones multicriterio	12
2.1 Técnicas de decisión multicriterio	12
2.2 Proceso de decisión multicriterio	13
2.3 Tipos de problemas de decisión	14
2.3.1 Análisis Envolvente de Datos (DEA - Data Envelopment Analysis).....	16
2.3.2 ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalitéE).....	17
2.3.3 PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation).....	17
2.3.4 TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) ..	18
2.3.5 AHP (Analytic Hierarchy Process).....	18
2.3.6 LÓGICA DIFUSA (Fuzzy Logic).....	19
3. Definición de la metodología de análisis	21
3.1 TOPSIS.....	21
3.1.1 Procedimiento TOPSIS.....	23
3.1.2 Flujo sintetizado del método TOPSIS	25
3.2 Proceso de análisis jerárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP).....	26
3.2.1 Algoritmo sintetizado del método AHP	28
3.3 Proceso de análisis jerárquico difuso (FAHP).....	29
3.3.1 Consistencia de las matrices de comparación pareadas.....	32
3.3.2 Flujo sintetizado del método FAHP+GA.....	34
4. Propuesta de modelo FAHP-GA+TOPSIS para la selección de tratamientos EOR 35	
4.1 Descripción del problema	35
4.2 Proceso de toma de decisiones FAHP-TOPSIS	37
4.3 Identificación de alternativas	39
4.4 Selección de criterios	40
4.4.1 Impacto en la producción (CG1)	42
4.4.2 Complejidad de implementación (CG2)	43
4.4.3 Criterios ambientales (CG3).....	44
4.4.4 Criterios sociales (CG4).....	46
4.5 Representación gráfica del problema de selección.....	47

5. Resultados	48
5.1 Aplicación de metodología FAHP+GA+TOPSIS en el caso de estudio.	48
5.2 Análisis de sensibilidad	58
5.3 Comparación de resultados entre modelos AHP, FAHP, TOPSIS, AHP+TOPSIS y FAHP+TOPSIS sobre el conjunto de alternativas.	61
6. Conclusiones	64
6.1 Trabajo futuro	66
A. Anexo: Métodos de recobro mejorado	67
B. Anexo: Etapas de un proyecto EOR	71
Diseño de EOR	71
Screening	71
Evaluación EOR	72
Implementación y monitoreo EOR	74
C. Anexo: Base matemática del AHP	75
D. Anexo: Lógica difusa	80
Teoría de conjuntos difusos.....	80
Funciones de pertenencia	81
Operaciones aritméticas de números difusos	82
Defusificación o desdifusión	83
E. Anexo: Algoritmo genético	86
Fases de un algoritmo genético	87
Matrices difusas inconsistentes	88
Propuesta de algoritmo genético	89
Inicialización	89
Evaluación.....	89
Selección.....	90
Reproducción	90
Mutación.....	91
Condiciones de parada.....	91
Diagrama de flujo algoritmo genético.....	92
F. Anexo: Normalización	93
G. Anexo: Tablas de preferencias	97
H. Anexo: Tablas de sensibilidad	107
I. Anexo: Metodología de evaluación financiera para la obtención de parámetros económicos.	114
J. Anexo: Perfil de los expertos	117
7. Bibliografía	119

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos, pesados y extrapesados	8
Figura 2 Efectos físicos de los métodos de recobro mejorado.	9
Figura 3 Hoja de ruta de los métodos de recobro mejorado	10
Figura 4 Pasos del proceso de decisión multicriterio.....	13
Figura 5 Métodos más utilizados para análisis de las decisiones multicriterio.	16
Figura 6 Distancia a la alternativa ideal y anti-ideal.....	22
Figura 7 Algoritmo para el método TOPSIS	25
Figura 8 Diagrama de flujo del proceso analítico jerárquico.	28
Figura 9 Algoritmo sintetizado del método AHP difuso.....	34
Figura 10 Algoritmo del proceso de selección Fuzzy AHP-TOPSIS- (Parte1).	37
Figura 11 Algoritmo del proceso de selección Fuzzy AHP-TOPSIS(Parte2)	38
Figura 12 Metodología para identificar y seleccionar los criterios.....	41
Figura 13 Criterios globales y criterios locales seleccionados	47
Figura 14 Mapa conceptual de la correlación entre criterios y alternativas.....	47
Figura 15 Juicios planteados por los expertos para cada comparación pareada de los criterios locales evaluados.	49
Figura 16 Juicios planteados por los expertos para cada comparación pareada de los criterios globales evaluados	50
Figura 17 Corrección de la inconsistencia del total (media geométrica) de los juicios planteados por los expertos para la comparación pareada de los criterios globales, mediante el algoritmo genético propuesto.....	51
Figura 18 Representación de pesos totales para los criterios globales	52
Figura 19 Representación de las pesos de cada sub-criterio o criterio local	53
Figura 20 Representación ponderación final de criterios.....	54
Figura 21 Análisis de valor para las alternativas de acuerdo a los criterios.	55
Figura 22 Representación gráfica del ordenamiento de las alternativas.....	57
Figura 23 Gráfico radial de la alternativa más óptima a la menos óptima	58
Figura 24 Ranking de alternativas de acuerdo al análisis de sensibilidad	60
Figura 25 Escalas de evaluación para procesos de recobro mejorado.....	73
Figura 26 Conjunto difuso, ejemplo de altura..	81
Figura 27 Función de pertenencia para un conjunto difuso triangular	81
Figura 28 Función de pertenencia para un conjunto difuso trapezoidal.....	82
Figura 29. Diagrama de flujo del Algoritmo genético.	92

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Métodos de análisis de decisión multicriterio según el tipo de problema.....	15
Tabla 2. Ventajas y desventajas de métodos multicriterio más utilizados.	19
Tabla 3. Matriz de decisión TOPSIS.....	23
Tabla 4. Matriz de decisión normalizada TOPSIS.....	24
Tabla 5. Ejemplo de determinación de la alternativa ideal positiva y la alternativa anti-ideal.	24
Tabla 6. Escala de comparación pareada: significado de la importancia cuantitativa con la cual se ponderan los criterios de selección en un proceso jerárquico.....	27
Tabla 7. Escala difusa de comparación pareada.	29
Tabla 8. Alternativas a evaluar. Combinaciones fluido-químico.	40
Tabla 9. Valoración semi-cuantitativa	42
Tabla 10. Matriz de consecuencias normalizada. Elaboración propia.....	54
Tabla 11. Jerarquización de alternativas después de aplicar TOPSIS usando los pesos obtenidos de Fuzzy AHP	55
Tabla 12. Selección de alternativa óptima de acuerdo a cada criterio.	58
Tabla 13. Ranking de alternativas	59
Tabla 14. Comparación de métodos multicriterio.....	62
Tabla 15. Índices de consistencia aleatorios. Esta tabla muestra el número de elementos que se comparan y su respectivo índice de consistencia aleatorio en un proceso jerárquico	78
Tabla 16. Métodos de normalización más utilizados en métodos MCDA.	94
Tabla 17. Ponderación de los criterios globales por parte de los expertos para evaluación FAHP.	97
Tabla 18. Ponderación criterios locales por parte de los expertos para evaluación FAHP.	97
Tabla 19. Pesos de criterios obtenidos a partir de la implementación de la metodología FAHP.	98
Tabla 20. Valores de las alternativas respecto a cada criterio y sus respectivos pesos provenientes de FAHP.	99
Tabla 21. Ponderación de los criterios globales por parte de los expertos para evaluar la metodología AHP.	99
Tabla 22. Ponderación de criterios locales por parte de los expertos para evaluar metodología AHP.	100

Tabla 23. Pesos de criterios obtenidos a partir de la implementación de la metodología AHP.	101
Tabla 24. Ponderación de alternativas por parte de los expertos teniendo en cuenta cada criterio.	101
Tabla 25. Pesos de importancia obtenidos para cada alternativa respecto a cada criterio a partir de la implementación de AHP.	102
Tabla 26. Ranking de alternativas a partir de la metodología AHP.	103
Tabla 27. Valores de las alternativas respecto a cada criterio y sus respectivos pesos provenientes de AHP.	103
Tabla 28. Ranking de alternativas a partir de la metodología AHP+TOPSIS.	104
Tabla 29. Valores de las alternativas respecto a cada criterio y sus respectivos pesos dados por los expertos sin tener en cuenta ningún método de ponderación.	104
Tabla 30. Ranking de alternativas a partir de la metodología TOPSIS.	104
Tabla 31. Ponderación de alternativas por parte de los expertos teniendo en cuenta cada criterio.	105
Tabla 32. Ranking de alternativas a partir de la metodología FAHP.	106
Tabla 33 Caso 2 de análisis de sensibilidad.	107
Tabla 34 Caso 3 de análisis de sensibilidad.	107
Tabla 35 Caso 4 de análisis de sensibilidad.	108
Tabla 36 Caso 5 de análisis de sensibilidad.	108
Tabla 37 Caso 6 de análisis de sensibilidad.	108
Tabla 38 Caso 7 de análisis de sensibilidad.	109
Tabla 39 Caso 8 de análisis de sensibilidad.	109
Tabla 40 Caso 10 de análisis de sensibilidad.	110
Tabla 41 Caso 11 de análisis de sensibilidad.	110
Tabla 42 Caso 12 de análisis de sensibilidad.	110
Tabla 43 Caso 13 de análisis de sensibilidad.	111
Tabla 44 Caso 14 de análisis de sensibilidad.	111
Tabla 45 Caso 15 de análisis de sensibilidad.	111
Tabla 46 Caso 16 de análisis de sensibilidad.	112
Tabla 47 Caso 17 de análisis de sensibilidad.	112
Tabla 48 Caso 18 de análisis de sensibilidad.	112
Tabla 49. Flujo de Caja Libre	114

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

Abreviatura	Término
EOR	Enhanced Oil Recovery
MCDA	Multi-criteria Decision Analysis
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
AHP	Analytic Hierarchy Process
FL	Fuzzy logic
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELimination and Choice Expressing REality)
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MAUT/UTA	Multiple Attribute Utility Theory
UTADIS	UTilités Additives DIScriminantes
GAIA	Geometrical Analysis for Interactive Aid
DEA	Data Envelopment Analysis
TIR	Tasa Interna de Retorno
VPN	Valor Presente Neto
AG	Algoritmo Genético
DANY	Disolvente de Asfalteno a Nivel Yacimiento

Introducción

En el área de la ingeniería de petróleos, la correcta definición, evaluación y gestión de proyectos de recobro mejorado químico determinan el éxito o fracaso en el logro de los objetivos propuestos y por ende en la generación de beneficios. La formulación y gestión adecuada de un proyecto de este tipo, requiere conocer los aspectos relacionados con la formulación adecuada, las áreas y herramientas disponibles para su administración y los aspectos del entorno que determinan los resultados obtenidos en la ejecución del mismo. El recobro mejorado en Colombia es muy importante ya que el país se caracteriza por tener yacimientos de crudo pesado y su extracción por métodos convencionales se ha dificultado, por lo cual se recurre a la implementación de técnicas de recobro químico. Para evitar la mala formulación y evaluación de un proyecto de recobro mejorado químico se deben tener en cuenta ciertos factores que afectan directamente el proceso, para así obtener resultados idóneos.

Las operaciones de recobro mejorado (EOR por sus siglas en inglés) requieren de grandes inversiones, largos plazos de planificación y compleja ejecución. Para garantizar el éxito en un proyecto de EOR es importante que el tratamiento seleccionado sea el más indicado para las condiciones de un campo petrolero específico. Una vez tomada esta decisión se define y ejecuta el proyecto, por ende, se debe garantizar que no haya pérdidas económicas y afectaciones en el tiempo de desarrollo del proyecto.

Los gestores de los proyectos EOR en la industria de petróleo y gas se enfrentan a diferentes retos a la hora de seleccionar y jerarquizar los tratamientos de recobro mejorado. La selección de los químicos y combinación de éstos requiere un detallado análisis económico, ambiental, social y operacional; lo cual indica que la etapa de planificación EOR es de gran importancia, ya que los resultados de la ejecución de un proyecto EOR depende en gran medida de la planificación.

Actualmente, la selección de un tratamiento EOR depende de múltiples factores como la evaluación de factores cuantitativos, evaluaciones financieras, opiniones de expertos, etc., lo que lo convierte en un problema complejo, a esto agregando que existe una amplia y variada oferta de tecnologías disponibles para recobro mejorado químico; sin embargo, algunas de estas tecnologías aún se encuentran en etapa de desarrollo, lo que no permite identificar y calcular beneficios que justifiquen inversiones en el mediano plazo. Asimismo, las alternativas tienen costos de inversión altos y deben considerar el impacto en objetivos intangibles para las empresas, como imagen, estructuras sociales, aspectos legales, etc. Además de esto, el acceso a la información de resultados de las operaciones EOR con ciertos tratamientos sobre campos similares es confidencial, incompleta o inexistente, lo que genera incertidumbre en los datos referentes a: efecto de los tratamientos, impactos socio-ambientales y líneas base ambientales. Todos los anteriores aspectos justifican el uso de herramientas de apoyo a la toma de decisiones en los procesos de planeación en la industria de petróleo y gas.

Las dificultades mencionadas anteriormente pueden ser solucionadas mediante el uso de técnicas multicriterio que ayuden a reducir la incertidumbre como el uso de variables difusa y metodologías de selección y jerarquización, ya que pueden conducir a la solución más eficiente[1]. Las características asociadas a los tipos de problemas como por ejemplo, la selección de la mejor combinación químico fluido a inyectar en un proyecto de recobro mejorado químico, entran en el grupo de técnicas multicriterio, ya que las alternativas o posibles acciones se pueden enumerar y son limitadas, las características cuantitativas y cualitativas se pueden acoplar, el resultado obtenido se puede evaluar de diversas formas, un decisor o conjunto de decisores han de seleccionar la mejor alternativa u ordenar el conjunto de alternativas por preferencia, la jerarquización debe tener en cuenta diferentes criterios o puntos de vista en conflicto, la importancia de cada criterio es diferente y el ambiente donde se toma la decisión está determinado.

Este trabajo investigativo propone una metodología para la selección de la mejor combinación químico-fluido a inyectar en un proceso de recobro mejorado químico. En la primera parte del método se hace una selección de alternativas (m) como, por ejemplo, gas de reciclo, dióxido de carbono, Flue-gas, DANY, Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante, Nanocápsulas (NC) S20 y de criterios (n), por ejemplo, impacto en la producción, complejidad de implementación, criterios ambientales, criterios sociales, etc.

Luego, cada criterio es evaluado por unos expertos en una matriz particular $n \times n$. Una vez realizado esto, se determina el valor de cada criterio respecto a cada alternativa en una matriz de decisiones $m \times n$.

La selección de las combinaciones se hace usando principalmente dos métodos de selección: el primero es el proceso analítico jerárquico difuso (FAHP, por sus siglas en inglés) y segundo la Técnica de Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS, por sus siglas en inglés). El método FAHP se utiliza para calcular la ponderación de los factores cuantitativos y cualitativos, una vez completada la matriz de comparaciones pareadas con la información dada por los expertos, se pasa por una evaluación de consistencia, la cual indica si los valores ingresados por los expertos son adecuados. En este punto, se implementa un algoritmo genético (GA, por sus siglas en inglés) para optimizar la matriz de comparaciones pareadas difusa, corrigiendo la razón de consistencia y evitar así que los expertos vuelvan a llenar la matriz de comparaciones pareadas. Finalmente, con el procedimiento TOPSIS, se calcula la influencia de los factores y subfactores en la jerarquización de los tratamientos químicos EOR.

El modelo propuesto recopila un número reducido de datos de campo y tiene en cuenta la incertidumbre asociada a las opiniones de expertos. El modelo resuelve uno de los problemas de ponderación más criticados del AHP (la no inclusión de juicios de valor en una escala continua) integrando la lógica difusa. Además, de ser necesario, se activa la opción de utilizar algoritmos genéticos para optimizar la consistencia de las matrices difusas. Finalmente, la metodología TOPSIS calcula el alejamiento relativo de cada tratamiento a la solución ideal, logrando así una clasificación integral de los tratamientos químicos EOR candidatos.

Esta metodología busca obtener una decisión más confiable ya que, a partir del análisis de criterios, subcriterios e interdependencias, se facilita un mejor entendimiento de las alternativas disponibles. Este trabajo no tiene la finalidad de modificar la teoría de decisión multicriterio, sino de extender el uso de técnicas conocidas a un nuevo ámbito, con una problemática específica no encontrada en la literatura existente, y desarrollando un estudio detallado de las alternativas, los criterios importantes y su respectiva valoración.

La herramienta de soporte a la toma de decisiones propuesta se desarrolla con el lenguaje de programación Python. Este programa permite la selección de alternativas y criterios para su respectiva ponderación teniendo en cuenta la escala lingüística propuesta por Saaty: igual importancia, importancia moderada, importancia extrema, etc., y luego lo convierte a números triangulares para realizar los respectivos cálculos.

Esta propuesta es parte del proyecto Plan nacional para el potenciamiento de la tecnología CEOR con gas mejorado químicamente el cual será ejecutado en el Piedemonte llanero en los campos Floreña y Complejo Pauto operados por Equión Energía. El proyecto busca generar un aporte científico y tecnológico, responsable con el medio ambiente y la sociedad, con el fin de potenciar procesos en el recobro terciario como por ejemplo la selección del mejor tratamiento químico a aplicar en un campo a partir de sus características específicas.

Objetivo general

Desarrollar una herramienta para identificar la mejor alternativa de tratamiento para el recobro mejorado en un campo de petróleo teniendo en cuenta criterios de los expertos, criterios de yacimiento, sociales, económicos y ambientales y que pueda manejar información imprecisa.

Objetivos específicos

- Identificar criterios de evaluación técnicos, sociales, económicos y ambientales involucrados en el recobro mejorado.
- Identificar y analizar el peso de los criterios para establecer una prioridad entre las alternativas de tratamientos de recobro mejorado para un campo petrolero teniendo en cuenta la literatura científica, resultados del screening convencional, historia del campo y la experiencia de los gestores.

- Construir una herramienta de decisión que permita jerarquizar las alternativas de los tratamientos de recobro mejorado para un campo petrolero identificado, basada en metodologías multicriterio.

Hipótesis

El uso de una herramienta basada en técnicas de análisis multicriterio mejora el proceso actual de toma de decisiones en la selección de alternativas de tratamientos de recobro mejorado en la industria de petróleo y gas.

1. Recuperación terciaria o recobro mejorado de petróleo

1.1 Definición

La recuperación terciaria se realiza con el fin de revitalizar los campos maduros, es decir, incrementar la energía del yacimiento, disminuir la saturación de petróleo residual (fracción de volumen de poro ocupada por petróleo al final del proceso de desplazamiento del petróleo) y optimizar la eficiencia de barrido [2]. Esto, debido a que en el yacimiento queda el 60-80% del crudo original como consecuencia de las limitaciones de las recuperaciones primarias y secundaria. Generalmente cuando un campo llega a la etapa de recuperación terciaria, ya es un campo maduro [2].

Según la literatura, la madurez de un campo puede definirse como técnica o económica. De acuerdo con esto, un campo es maduro desde el punto de vista técnico cuando ha alcanzado un pico en su producción y produce con una declinación de presión. Así mismo, un campo puede considerarse maduro desde el punto económico si se ha alcanzado el límite económico después de la producción primaria y secundaria [3], entendiéndose por límite económico el punto en las curvas de declinación de producción donde la producción solo puede cubrir los gastos del campo o del pozo [4].

Teniendo en cuenta que el número de campos maduros seguirá aumentando cada año, estos campos son una fuente atractiva de petróleo adicional, debido a que tienen la ventaja de que las compañías operadoras y de servicios conocen el comportamiento y las propiedades del yacimiento, y por ende, pueden estimar con mayor facilidad el volumen de petróleo recuperable con técnicas terciarias [5]. La decisión de aplicar o no recobro mejorado es específica para cada campo porque además ser económicamente viable, debe ser ambiental y socialmente viable [5].

1.2 Métodos de recobro mejorado

La mayoría de los métodos corresponden a una de tres categorías principales: inyección de gas, inyección de químicos y técnicas termales (ver Figura 1) [5]. Cada una de las categorías que se pueden observar en la Figura 1 poseen una diversidad de formas de inyección, y algunas pueden combinarse entre sí para obtener resultados específicos. Los tipos de inyección pueden clasificarse como: inyección periférica o externa; en la cual los pozos inyectoros están agrupados en la parte central del yacimiento y los productores en la periferia, inyección en arreglos o dispersa; en la cual los pozos inyectoros se distribuyen entre los pozos productores formando figuras geométricas o de forma aleatoria. En algunos casos como en la inyección cíclica de vapor el pozo usado para la inyección es el mismo usado para la producción [6].

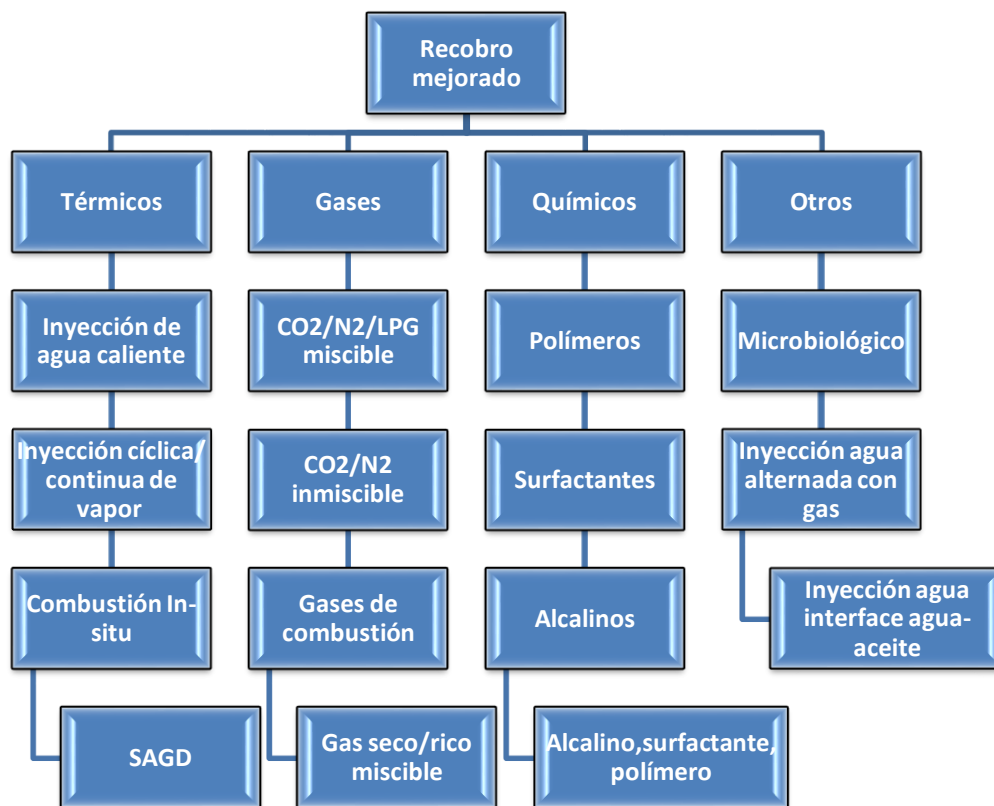


Figura 1 Fuente: Adaptado de A. Olajire, 2014. Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos, pesados y extrapesados [7]

En el Anexo A. se explica en detalle el tipo de técnicas de recobro mejorado.

Cada método de recobro mejorado genera diferentes efectos físicos en la formación como es ilustrado en la Figura 2.

Método EOR		Soporte de presión	Mejoramiento del barrido	Reducción de la IFT	Alteración de la mojabilidad	Reducción de la viscosidad	Dilatación del petróleo	HC fase única	Cambio composicional (1)	FRI
Inyección de agua	Agua									Caso base (2)
	Agua preparada									Bajo
Inyección de gas: inmiscible	HC									Moderado
	CO2									Alto
	N2							(3)	(3)	Moderado
Inyección de gas: miscible	HC								(4)	Alto
	HC WAG								(4)	Muy alto
	CO2									Alto
	CO2 WAG									El más alto
Método térmico	Vapor									Alto
	Aire a alta presión									Alto
Método químico	Polímero									Bajo
	Surfactante									Moderado
	ASP									Alto

Figura 2 Fuente: Adaptada de Al-Mjeni et al., 2011. Efectos físicos de los métodos de recobro mejorado. En la gráfica están sombreados los recuadros en donde los métodos de recuperación terciaria generan efectos físicos. En la última columna se encuentra el factor de recobro evaluado cualitativamente para cada método (FRI). HC=Hidrocarburo, IFT= tensión interfacial. WAG= inyección de agua alternada con gas. ASP= mezcla de álcali-surfactante-polímero. 1. Cambio de la composición del hidrocarburo líquido. 2. La inyección de agua constituye el caso base para la comparación de otros métodos. 3. El desgasolinado del petróleo se produce a medida que se desarrolla la miscibilidad. 4. Intercambio de evaporación-condensación. [5]

1.3 Etapas de un piloto recobro mejorado

Los pilotos de recobro mejorado constan de las siguientes fases: diseño, evaluación, implementación y monitoreo (en el Anexo B se presenta en detalle cada una de las fases). Un proyecto de recobro puede tener una duración entre 7 y 10 años. La etapa de identificación y diseño puede durar de 3-6 meses, la evaluación en laboratorios y estudios tiene una duración aproximada de 1 año, la planeación del proyecto piloto y su ejecución puede tener una duración de 1 año y la operación del piloto unos 2 años [5], [8]. De ahí en adelante la duración es variable dependiendo del éxito del proyecto, si este es exitoso se realiza un diseño para el desarrollo en campo y se implementa en todo el campo [5], [8].

El proceso para reducir la incertidumbre de los parámetros económicos y de yacimiento consiste en realizar una selección de un método de recobro mejorado basada en los datos disponibles y teniendo en cuenta los éxitos y fracasos del proceso escogido en campos similares al de estudio. Si este paso es aprobado, se pasa a la etapa de laboratorio,

simulación numérica y evaluación económica [5]. Una vez aprobados todos los pasos anteriores, se implementa un piloto en campo y luego de resultados exitosos se extiende a todo el campo. Como se muestra en la Figura 3, esta evaluación por etapas, ayuda a reducir la incertidumbre asociada a el proceso EOR seleccionado; además, cabe anotar que cada vez que se pasa de un paso a otro más avanzado se requerirá de un esfuerzo mayor tanto económico como intelectual y académico, ya que la metodología empieza con actividades menos costosas y termina con actividades que requieren una inversión significativa (del orden de miles de billones) [9].

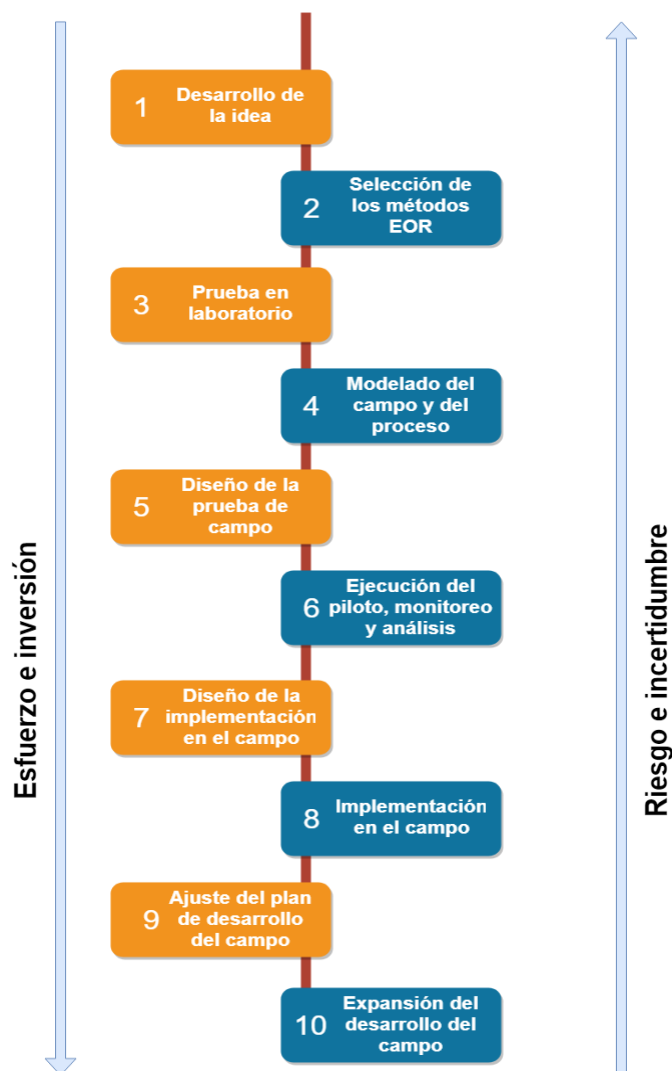


Figura 3 Fuente: Adaptado de Al-Mjeni et al., 2011. Hoja de ruta de los métodos de recobro mejorado [5].

Así, las operaciones de recobro mejorado se realizan de la siguiente manera: se determina la técnica EOR a emplear, se escogen los químicos a utilizar, luego se establece la formulación óptima para el mayor recobro de crudo, se definen los tiempos o volúmenes a inyectar del tratamiento escogido para los pozos que se intervendrán. Después se selecciona el arreglo de pozos (inyectores-productores) a afectar, se evalúan las distintas estrategias de implementación, se realizan los análisis financieros y ambientales necesarios y se escoge una estrategia de implementación. Finalmente, se implementa y se hace la evaluación respectiva del proyecto piloto.

2. Análisis de decisiones multicriterio

El análisis de las decisiones multicriterio (MCDA por sus siglas en inglés) incluye diversos conceptos, métodos y técnicas que permiten el soporte de la toma de decisiones entre un conjunto de objetivos usualmente en conflicto, en un ambiente donde se pretende satisfacer en la medida de lo posible una serie de metas asociadas a dichos objetivos [10],[11]. El MCDA acopla las matemáticas, la administración, la informática, la psicología, las ciencias sociales, la economía y las ciencias ingenieriles [12]. Desde 1960 se empezó a desarrollar y a expandir desde 1970 a partir de las ciencias económicas e ingeniería industrial, hasta convertirse hoy en día en una herramienta científica [13]. En 2002 Belton & Stewart , definen el análisis de decisiones con múltiples criterios, MCDA, por el nombre en inglés, como “Un término amplio que incluye una colección de conceptos, métodos y técnicas que persiguen ayudar a los individuos o grupos a tomar decisiones que implican diferentes puntos de vista en conflicto y múltiples agentes interesados” [14].

2.1 Técnicas de decisión multicriterio

Un proceso de toma de decisión puede definirse como la elección por parte de un grupo decisor o un individuo sobre “la mejor alternativa” en un determinado ambiente [10]. El análisis multicriterio es importante en la ingeniería por su potencial para la solución de problemas complejos [10]: gran número de alternativas, distintos criterios que ninguna alternativa satisface completamente, diferentes decisiones o agentes interesados, gran volumen de información cualitativa [10], [11]. El propósito de las técnicas de decisión multicriterio es ayudar al decisor a reflexionar de manera objetiva sobre situaciones complicadas para mejorar la calidad de las resoluciones finales, teniendo en cuenta que a una buena resolución se llega a través de un profundo conocimiento y comprensión del problema [15].

Un método de toma de decisiones discreto consiste en la elección, por parte de uno o varios decisores, de la mejor alternativa entre un conjunto finito soluciones factibles. La selección del modelo matemático adecuado para solucionar un problema del tipo MCDA discreto debe tener en cuenta si las partes interesadas en el proceso de decisión son un grupo y en tal caso se deben usar sistemas de ayuda a la decisión en grupo (GDSS) y si el tipo de decisión a tomar requiere organización o ponderación de alternativas, se recomienda usar un método de jerarquización de alternativas [16]. También se debe considerar la forma de pensar del decisor para determinar un método de clasificación de preferencias. Se sugiere escoger el método de soporte a la decisión multicriterio que pueda manejar la información disponible y se debe explicar adecuadamente a los interesados el grado de ponderación del método utilizado. Asimismo, un *software* de soporte a la decisión del método también es un factor importante a considerar, debido a que facilitaría el proceso de análisis y toma de decisión [16].

2.2 Proceso de decisión multicriterio

Un proceso de decisión multicriterio, como se puede observar en la Figura 4, inicia cuando uno o varios decisores admiten la existencia de un problema. A partir de este momento se definen los parámetros de este problema, teniendo en cuenta los valores del grupo de decisores; es decir, qué metas quieren alcanzar. Con esto en mente, se modela un sistema de decisión donde se identifican los objetivos, alternativas y sus consecuencias tales como la incertidumbre asociada a éstas, y se definen los criterios relevantes para comparar las diferentes alternativas. Posteriormente se implementa un modelo o método MCDA mediante el cual se ponderan estas alternativas para obtener las preferencias de los decisores. Los puntajes de las ponderaciones se utilizan para la comparación entre alternativas, los resultados se organizan jerárquicamente y finalmente se realiza un análisis de sensibilidad donde se puede ver el nivel de solidez e incertidumbre de la solución seleccionada [17].



Figura 4 Modificado de Fontana, 2015. Pasos del proceso de decisión multicriterio [17].

2.3 Tipos de problemas de decisión

Teniendo en cuenta la definición planteada en *Multi-Criteria Decision Analysis Methods and Software*, ([18], p.3) los problemas de selección se clasifican en:

- **Problemas de selección:** *El objetivo es seleccionar la mejor opción o reducir el grupo de opciones a un subconjunto de opciones "buenas" equivalentes o incomparables [18].*
- **Problemas de clasificación:** *Las opciones se ordenan en grupos predefinidos. El objetivo es reagrupar las opciones con comportamientos o características similares por razones descriptivas, organizativas o predictivas. Los métodos de clasificación son útiles para uso repetitivo o automático [18].*
- **Problemas de ordenamiento:** *Las opciones se ordenan de mejor a peor por medio de puntajes o comparaciones por pares, etc. El orden puede ser parcial si se consideran o completan opciones incomparables [18].*
- **Problemas de descripción:** *El objetivo es describir las opciones y sus consecuencias, esto generalmente se realiza como primer paso para comprender las características del problema de decisión [18].*

De acuerdo a la definición encontrada en la literatura, ([17], p.6) y ([15], p.67), los elementos en el análisis de las decisiones multicriterio son:

- **Decisor:** *es el individuo o grupo de personas encargado de tomar una decisión, teniendo en cuenta sus preferencias respecto a las metas a lograr y la ponderación de la importancia relativa de cada criterio [17].*
- **Analista:** *persona encargada de seleccionar el método de decisión a utilizar, y que, a partir de las preferencias del decisor, extrae del mismo recomendaciones para tomar las decisiones correspondientes [17].*

2- Análisis de decisiones multicriterio

- **Criterios:** son los atributos o características que definen el comportamiento de cada alternativa y que tienen un impacto diferente en cada una de las soluciones posibles [15].
- **Pesos:** son ponderaciones que se realizan para calcular la importancia relativa que los criterios tienen sobre las alternativas y para el decisor [15].
- **Alternativas:** son las posibles soluciones o acciones sobre un determinado problema. Poseen características cualitativas o cuantitativas, y según la naturaleza del problema, son finitas o infinitas [15].

El desarrollo tecnológico de las últimas dos décadas ha permitido desarrollar métodos de análisis de decisiones complejos, por ende en la literatura se puede encontrar una gran cantidad de métodos de toma de decisiones multicriterio [18], [19], algunos de los métodos más populares encontrados en la bibliografía, teniendo en cuenta el tipo de problema de decisión que resuelven, son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Adaptado de Ishizaka e al. 2013 [18]. Métodos de análisis de decisión multicriterio según el tipo de problema

Métodos MCDA según el tipo de problema			
Problemas de selección	Problemas de Clasificación	Problemas de Ordenamiento	Problemas de Descripción
AHP	AHP	AHP Sort	GAIA
ANP	ANP	UTADIS	Fs-GAIA
MAUT/UTA	MAUT/UTA	FlowSort	
MACBETH	MACBETH	ELECTRE III	
PROMETHEE	PROMETHEE		
ELECTRE I	ELECTRE II		
TOPSIS	TOPSIS		
GOAL PROGRAM	DEA		
DEA			

Existen diferentes formas de agrupar o clasificar a las metodologías para el análisis de las decisiones multicriterio. Esto se realiza teniendo en cuenta la forma en que clasifican las alternativas o los objetivos y en la forma de transformar las mediciones y percepciones a una escala única, para así poder comparar los elementos y establecer ordenes de prioridad [17]. Los métodos multicriterio también se pueden clasificar en métodos de programación

multiobjetivo, de programación por metas, de sobrecalificación, y métodos basados en jerarquías.

Los métodos MCDA pre-seleccionados (Figura 5) para abordar el problema de esta tesis, se determinaron a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva, considerando la necesidad del problema particular: seleccionar una alternativa dentro de un conjunto de alternativas discretas teniendo en cuenta diferentes factores y sub-factores. Los métodos de análisis multicriterio preseleccionados para este trabajo son: Técnica de Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS), Proceso analítico jerárquico (AHP), Lógica difusa, Análisis Envolvente de Datos (DEA), ELECTRE, PROMETHEE.

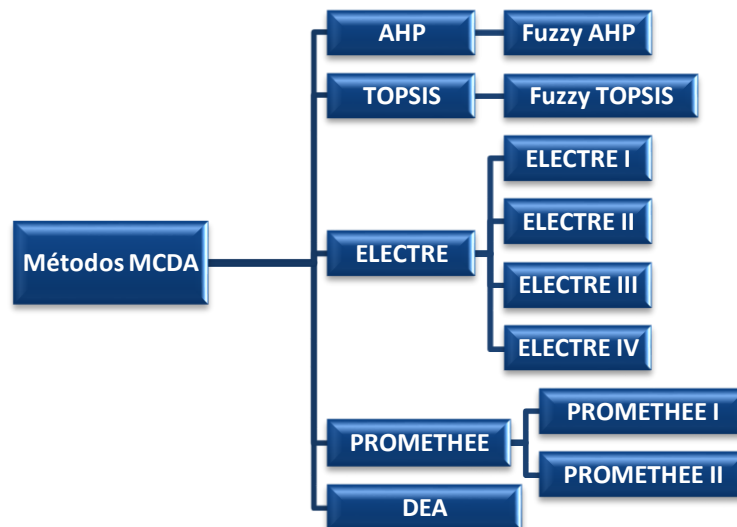


Figura 5 Métodos más utilizados para análisis de las decisiones multicriterio. Adaptado de Martín, A. et al., 2013[20].

A continuación, cada uno de estos métodos será descrito de forma resumida y luego se expondrá de forma general las ventajas y desventajas de cada método, para así poder abordar el problema con el mejor método o combinación de métodos posible.

2.3.1 Análisis Envolvente de Datos (DEA - Data Envelopment Analysis)

El Análisis Envolvente de Datos utiliza una técnica de programación lineal para medir las eficiencias relativas de las alternativas a partir de un conjunto de observaciones. La

frontera de las eficiencias encontradas se basa en el criterio de Pareto. Este método puede manejar múltiples entradas y salidas, además es capaz de descubrir relaciones que pueden estar ocultas con otros métodos [1], [19]. Se usa comúnmente en economía [1], [19].

2.3.2 ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REALitéE)

El método de eliminación y elección que expresan la realidad (ELECTRE), fue propuesto por Benayoun, Roy y Sussman (1966). ELECTRE, al igual que sus derivaciones, es un método de decisión multicriterio discreto basado en sobrecalificación, lo que indica que una alternativa puede ser mejor que otra, aunque no lo sea en todos los criterios. El método analiza tanto el grado de concordancia, como el de discordancia. La concordancia refleja hasta qué punto para un elevado número de atributos de la alternativa 'a' es preferida sobre 'b'. El índice de concordancia se obtiene sumando los pesos asociados a los criterios en los que la alternativa 'a' es mejor que la alternativa 'b' y en caso de empate se asigna la mitad del peso a cada una de las alternativas. La discordancia mide hasta qué punto no existe ningún atributo para el que la alternativa 'a' es preferida sobre 'b'. El índice de discordancia se calcula como la diferencia mayor entre los criterios para los que la alternativa 'a' es superada por la alternativa 'b' dividido por la mayor diferencia en valor absoluto entre la alternativa 'a' y 'b' para todos los criterios [21]. Una desventaja es que su proceso y resultados pueden ser difíciles de explicar en términos sencillos a un personal que no esté relacionado con esta metodología multicriterio. ELECTRE se ha utilizado en economía, medio ambiente, gestión del agua y problemas de transporte [19].

2.3.3 PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation)

El método para la organización de clasificación de preferencias para el enriquecimiento de evaluaciones (PROMETHEE), fue propuesto por Brans y Vincke en 1985 y perfeccionado por Brans y Mareschal en 2005. Este método al igual que sus derivaciones, están basados en una relación de sobreclasificación o superación. PROMETHEE parte de una matriz de decisión, en donde todas las valoraciones están expresadas en escala cardinal, el decisor asignará una preferencia en función de la magnitud de la comparación por pares de cada criterio (desvío). Con el fin de ayudar al decisor en la selección de las funciones de preferencia, se puede tener en cuenta un conjunto de criterios generalizados propuestos

por el método [17],[18]. Una de las desventajas de este método es que no proporciona claridad para asignar pesos. PROMETHEE ha sido utilizado mayormente en gestión ambiental, gestión empresarial y financiera, logística y transporte, fabricación, gestión de la energía y agricultura [19].

2.3.4 TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

La técnica de orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS) es un método de decisión multicriterio discreto basado en rankings. Este método fue desarrollado por Hwang y Yoon en 1981, y se basa en la teoría de que es deseable que una alternativa determinada se ubique a la menor distancia respecto de una alternativa ideal y a una mayor distancia de una alternativa que represente lo peor [21], [22]. Es un proceso simple, fácil de usar, efectivo y programable. Además de que el número de pasos sigue siendo el mismo independientemente del número de atributos. Una desventaja es que no considera la relación de criterios-alternativas a la hora de ponderar, por ende, es difícil ponderar los criterios y mantener la consistencia del juicio. TOPSIS se ha utilizado en logística, sistemas de diseño, ingeniería, fabricación, marketing, gestión medioambiental, gestión de recursos humanos, energía y gestión de los recursos hídricos [19].

2.3.5 AHP (Analytic Hierarchy Process)

El proceso de análisis jerárquico (AHP), fue desarrollado por Tomas Saaty en 1980, es un método de decisión multicriterio discreto basado en rankings o clasificación de alternativas. Es uno de los métodos más populares de MCDM y se caracteriza por descomponer un problema complejo en partes, para así poder ordenar estas partes o variables jerárquicamente. También asigna valores numéricos a la importancia relativa de cada variable y sintetiza los juicios o valoraciones para determinar qué variables tienen mayor prioridad y cómo influyen sobre la situación. AHP tiene muchas ventajas como es su facilidad de uso y no requiere gran cantidad de datos de entrada [23]. Entre sus desventajas está que no tiene en cuenta la interdependencia entre criterios y alternativas, y la escala de ponderación no es continua, por tanto, no considera la incertidumbre asociada a la escala lingüística relacionada con la ponderación. AHP se ha utilizado en áreas como gestión de recursos, política, estrategia corporativa y planificación [19].

2.3.6 LÓGICA DIFUSA (Fuzzy Logic)

La lógica difusa fue planteada por Zadeh en 1965. Es una generalización de la lógica clásica con fronteras imprecisas. Es una de las herramientas de la inteligencia artificial que utiliza la experiencia del ser humano para generar un razonamiento que permita la toma de decisiones. La lógica difusa, es una forma de lógica multivaluada que puede manejar el razonamiento y representar un sistema de gestión a través de un modelo matemático no lineal y para ello se utilizan variables lingüísticas se utilizan en la definición de conjuntos [24], [25]. Algunas ventajas de la lógica difusa es que permite desarrollar procedimientos con variables de entrada imprecisas, y además ayuda a resolver y abarcar problemas de gran dificultad. Su desventaja más notoria es la dificultad de su uso y desarrollo. La lógica difusa se ha usado en ingeniería, economía, gestión ambiental, problemas sociales y médicos [19].

A continuación, en la Tabla 2. se pueden observar las ventajas y desventajas de los métodos de decisión multicriterio a los que se ha hecho referencia:

Tabla 2 Fuente: M. Velasquez, 2015. [19]Ventajas y desventajas de métodos multicriterio más utilizados.

Método	Ventaja	Desventaja
AHP	Fácil de usar, estructura jerárquica puede ajustarse fácilmente a cualquier tamaño, no intensivo en datos de entrada, basado en estudios psicosociales y matemáticos.	La ponderación es discreta, generando incertidumbre. No se puede tener en cuenta las interdependencias entre los grupos de elementos.
Lógica difusa	Permite una entrada imprecisa, toma en cuenta información insuficiente, permite continuidad.	Difícil de desarrollar, puede requerir numerosas simulaciones antes de su uso.
ELECTRE	Toma en cuenta la incertidumbre.	Su proceso y resultado pueden ser difíciles de explicar en términos sencillos. Las fortalezas y debilidades de las alternativas no se identifican directamente.

PROMETHEE	Fácil de usar, no requiere el supuesto de que los criterios son proporcionales.	No proporciona un método claro para asignar pesos.
TOPSIS	Proceso sencillo, fácil de usar y programar, el número de pasos es igual independientemente del número de atributos.	No considera la correlación de atributos, difícil de ponderar y mantener la consistencia del juicio.
DEA	Puede manejar múltiples entradas y salidas, la eficiencia de los resultados se puede analizar y cuantificar.	Supone que todos los datos de entrada y salida se conocen con exactitud. Los resultados pueden ser sensibles dependiendo de las entradas.

3. Definición de la metodología de análisis

Teniendo en cuenta la literatura, los métodos más usados y fáciles de implementar independientemente del número de variables son AHP y TOPSIS [19].

TOPSIS está basado en el concepto de distancia a las soluciones ideales y anti-ideales de un problema de decisión, lo que lo hace un método estructurado y, en general, completo. Sin embargo, su falencia radica en que la ponderación no tiene en cuenta la correlación de criterios; por ende, es difícil de ponderar manteniendo la consistencia de las preferencias o juicios aplicados [19]. TOPSIS se puede complementar con AHP el cual es un método fácilmente combinable con otros métodos, ya que su uso se centra en el cálculo de ponderaciones de la importancia de los criterios que definen el problema de toma de decisiones, manteniendo la consistencia de los juicios [1], [19].

Aunque la escala discreta de AHP es sencilla de utilizar, no tiene en cuenta la imprecisión de los datos de entrada y la incertidumbre asociada a éstos, ya que los datos son juicios subjetivos o vagos. Es aquí donde se propone utilizar AHP con lógica difusa lo que resultara en la inclusión de una escala continua en los juicios de valor, cubriendo así desventajas del método AHP [26]. Por ende, los métodos seleccionados para solucionar el problema de decisión presentado en esta tesis son TOPSIS+ FuzzyAHP en conjunto con un Algoritmo Genético que tendrá como fin de optimizar la consistencia de las matrices de comparaciones pareadas del proceso analítico jerárquico difuso.

A continuación, se describirán los métodos seleccionados.

3.1 TOPSIS

La técnica de ordenación de preferencias por similitud a la solución ideal mejor conocida como TOPSIS, plantea que la alternativa seleccionada deberá tener la menor distancia a la alternativa ideal y la mayor distancia a una alternativa anti-ideal (Figura 6). La alternativa ideal, no necesariamente observada, se determina a partir de los mejores valores del conjunto de alternativas. Así, la alternativa anti-ideal, es una alternativa que no necesariamente integra el conjunto de alternativas reales y se determina a partir de los

peores valores del conjunto de alternativas. El método TOPSIS aborda el problema de jerarquizar alternativas teniendo en cuenta el principio expresado anteriormente [22].

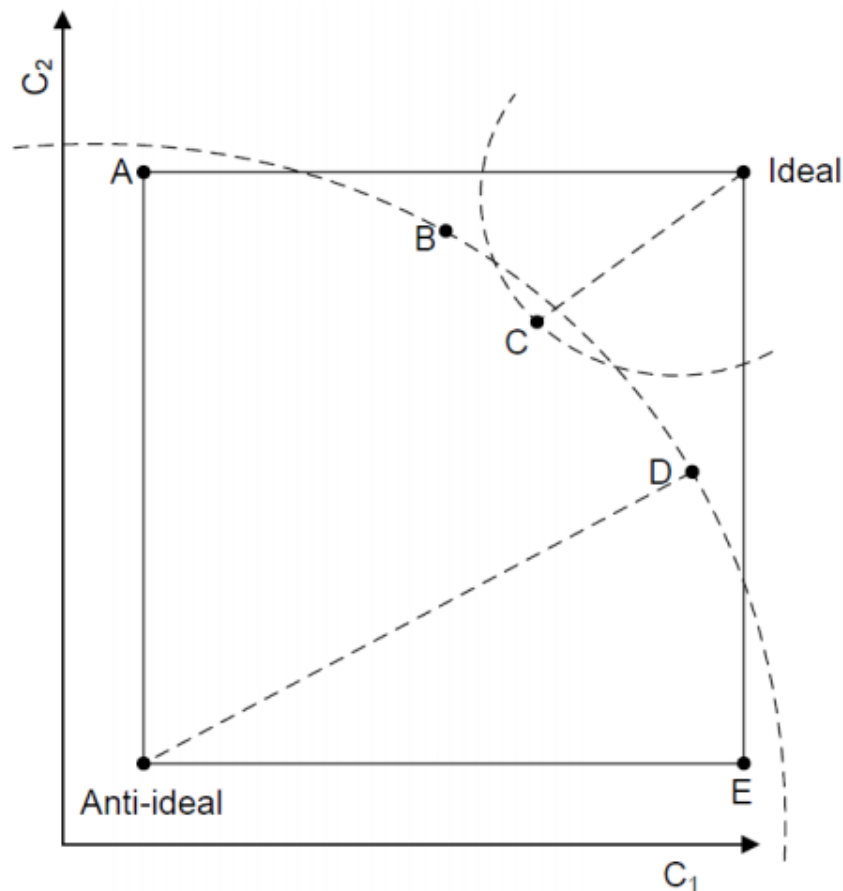


Figura 6. Fuente: Ruiz, J. 2015. Distancia a la alternativa ideal y anti-ideal. En la figura se puede observar como la alternativa C es la más próxima al ideal; sin embargo, no es la más lejana a la alternativa anti-ideal, a diferencia de B y D [21].

Características principales:

- Es deseable que la mejor alternativa (seleccionada) se ubique a la menor distancia respecto de una alternativa ideal que representa lo mejor (ideal positiva o simplemente ideal) y a mayor distancia respecto de una alternativa anti-ideal que representa lo peor (ideal negativa o anti-ideal) [21], [22].
- La mejor alternativa para los criterios que representan algo deseable es la que maximiza estos criterios [21], [22].

3- Definición de la metodología de análisis

- Cuando los criterios representan algo indeseable, entonces la mejor alternativa es la que minimiza estos criterios [21], [22].
- La alternativa ideal surge de elegir el máximo valor de entre las alternativas para los distintos criterios que representan algo deseable y el mínimo valor los criterios representan algo indeseable. La alternativa anti-ideal sería lo opuesto [21], [22].

3.1.1 Procedimiento TOPSIS

Paso 1. Definición de la matriz de decisión: definir el conjunto de alternativas y criterios con su respectivo peso y el valor de cada atributo en cada alternativa. Para construir esta matriz es necesario determinar el conjunto de alternativas y de criterios y conocer el valor de cada atributo en cada alterativa, además se debe establecer los pesos que se le darán a cada criterio. El valor de cada atributo de cada alternativa son las componentes de cada fila y columna de la matriz [21], [22].

Tabla 3. Matriz de decisión TOPSIS [21], [22].

	Max(C_1)	Min(C_2)	Min(C_j)	Max(C_n)
A_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1n}
A_2	\vdots	r_{22}	r_{2j}	\vdots
A_m	r_{m1}	r_{mn}
Pesos Criterios	W_1	W_2	W_j	W_n

Paso 2. Normalización de la matriz de decisión: dividir cada componente por la norma del vector columna del que es parte. TOPSIS utiliza el siguiente método para normalizar la matriz [21], [22]. (Ver anexo F, para una revisión bibliográfica más profunda sobre normalización).

- Cálculo de la norma del vector:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij})^2} \quad (1)$$

- Normalizar dividiendo cada componente por la norma del vector columna:

$$V_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij})^2}} \quad (2)$$

Paso 3. Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada: ponderar cada valor por el peso de cada criterio [21], [22].

Tabla 4. Matriz de decisión normalizada TOPSIS [21], [22].

	Max(C_1)	Min(C_2)	Min(C_j)	Max(C_n)
A_1	$V_{11} * W_1$	$V_{12} * W_2$...	$V_{1n} * W_n$
A_2	⋮	$V_{22} * W_2$	$V_{2j} * W_j$	⋮
A_m	$V_{m1} * W_1$	$V_{mn} * W_n$

Paso 4. Determinación de la alternativa ideal positiva y la alternativa anti-ideal o ideal negativa: seleccionar de entre los valores dados para los atributos en cada alternativa el mejor valor para la alternativa ideal y el peor para la anti-ideal [21], [22].

Tabla 5. Ejemplo de determinación de la alternativa ideal positiva y la alternativa anti-ideal.

Ideal	Anti-Ideal
Max(C_1)	Min(C_1)
Min(C_2)	Max(C_2)
Min(C_j)	Max(C_j)
Max(C_n)	Min(C_n)

Paso 5. Cálculo de las medidas de distancia: determinar las distancias de cada alternativa a la solución ideal y anti-ideal, medidas que se resumen mediante un vector [21], [22].

- Distancia a la alternativa ideal:

$$\bar{d}_i^+ = \sqrt{\sum_j (\bar{v}_{ij} - A_j^+)^2} \quad (3)$$

Donde $\bar{v}_{ij} = V_{mn} * W_n$, es decir el valor de cada alternativa y A_j^+ es la alternativa ideal

3- Definición de la metodología de análisis

- Distancia a la alternativa anti-ideal:

$$\bar{d}_i^- = \sqrt{\sum_j (\bar{v}_{ij} - A_j^-)^2} \quad (4)$$

Donde $\bar{v}_{ij} = V_{mn} * W_n$, es decir el valor de cada alternativa y A_j^- es la alternativa anti-ideal.

Paso 6. Calcular de la proximidad relativa a la alternativa ideal [21], [22]:

$$\overline{RS}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-} \quad (5)$$

Donde \bar{d}_i^- es la distancia a la alternativa anti-ideal y \bar{d}_i^+ es la distancia a la alternativa ideal

Paso 7. Ordenación de las preferencias: ordenar de mayor a menor las distancias de proximidad relativa determinadas en el paso anterior [21], [22].

3.1.2 Flujo sintetizado del método TOPSIS

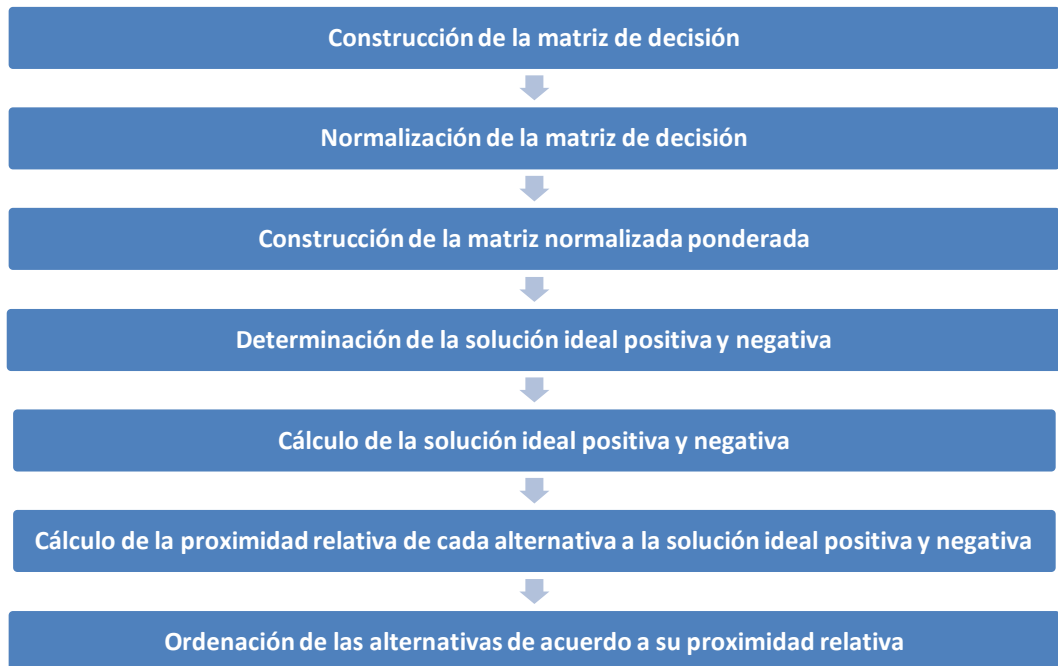


Figura 7 Algoritmo para el método TOPSIS [21], [22].

3.2 Proceso de análisis jerárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP)

El proceso de análisis jerárquico AHP se basa en diferentes pasos (Toskano Hurtado, 2002) [27]:

- Definición del problema
- Estructuración del problema jerárquico, mediante la identificación de alternativas, metas y criterios a evaluar.
- Ponderación de criterios.
- Evaluación de los elementos de cada nivel contra otros elementos mediante la asignación de pesos
- Aplicación del algoritmo de ponderación para determinar el ranking o importancia de las opciones sobre un conjunto de alternativas.
- Síntesis de resultados.
- Análisis de Sensibilidad.

Teniendo en cuenta el estudio publicado por Thomas Saaty en 2001, el proceso de análisis jerárquico tiene 3 principios básicos:

- **Construcción de jerarquías:** consiste en fraccionar el problema en diferentes partes que se puedan jerarquizar. Estas partes incluyen: objetivos, criterios generales, criterios específicos y alternativas [23], [28].
- **Establecimiento de prioridades:** este paso se realiza utilizando La escala de importancia propuesta por Saaty, la cual puede ser observada en la Tabla 6, esta es una herramienta propuesta para establecer la preferencia de los decisores sobre los criterios o alternativas en la matriz de comparaciones pareadas [23], [28].
- **Consistencia lógica:** este principio se relaciona con el grado de inestabilidad de los juicios dados por los decisores. Debido a que la mente humana no está preparada para dar juicios 100% consistentes numéricamente, en este punto se aplican procedimientos matemáticos, tal que, se llegue a un orden de las

3- Definición de la metodología de análisis

preferencias de cada elemento analizado de manera coherente y no contradictoria. Así los resultados obtenidos podrían ser válidos en el mundo real [23], [28].

El método se basa en observaciones de psicólogos en las cuales se determinó que la mente humana está muy bien diseñada para las comparaciones por pares, o sea para comparar elementos de dos en dos, pero no para hacer comparaciones globales. Basado en la idea de que la mente humana puede realizar comparaciones por pares, el profesor Saaty plantea la siguiente escala de comparación pareada entre criterios [23]:

Tabla 6. Fuente: Thomas Saaty, 2001. Escala de comparación pareada: significado de la importancia cuantitativa con la cual se ponderan los criterios de selección en un proceso jerárquico

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.
2	Débil	
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.
4	Importancia más moderada	
5	Preferencia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.
6	Preferencia más fuerte	
7	Preferencia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.
8	Preferencia muy, muy fuerte.	
9	Extremadamente preferida	Preferencia clara y absoluta de una actividad sobre otra.

En el anexo C se presenta en detalle la base matemática del proceso analítico jerárquico.

3.2.1 Algoritmo sintetizado del método AHP

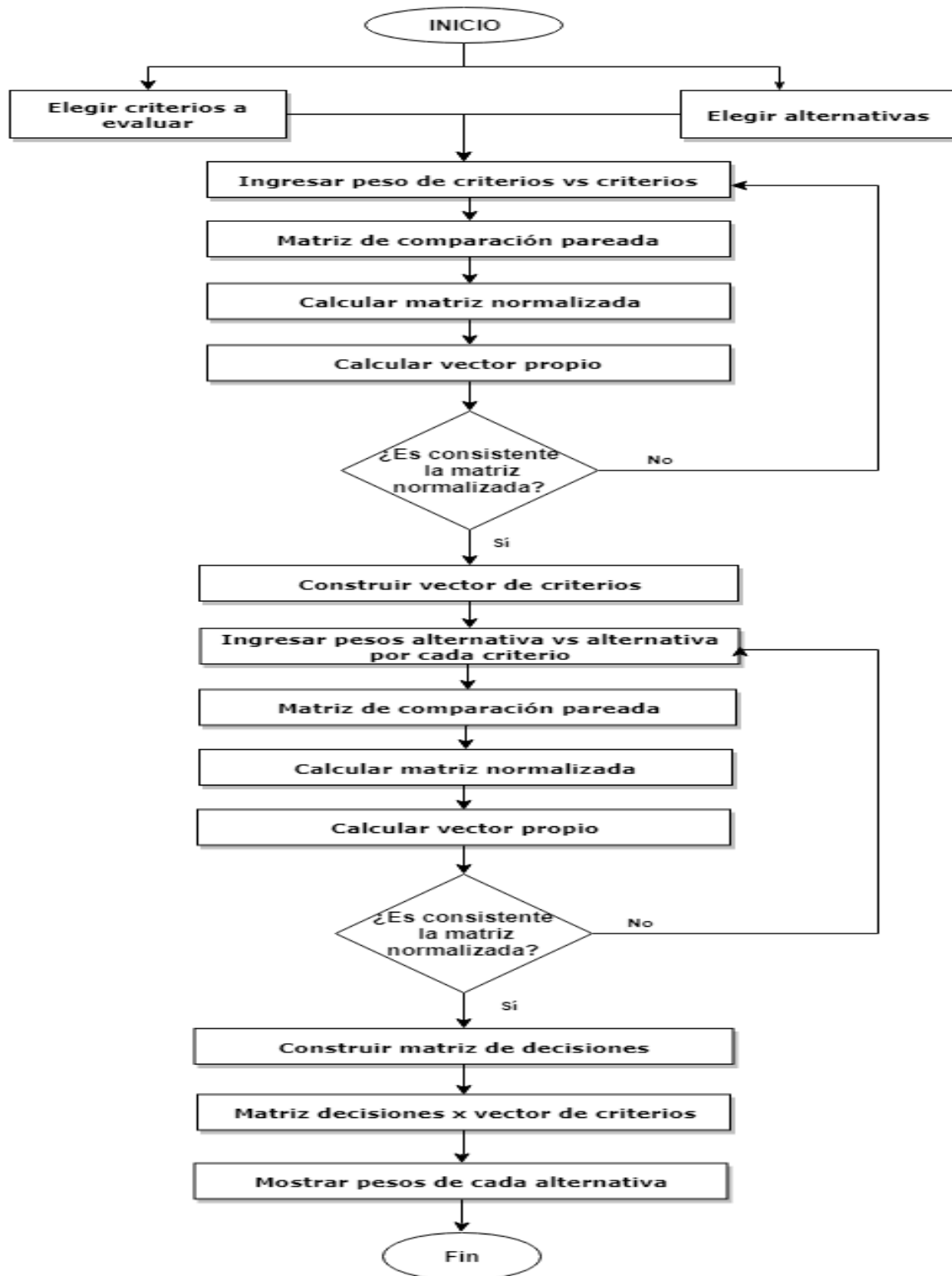


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso analítico jerárquico [29].

3.3 Proceso de análisis jerárquico difuso (FAHP)

El AHP difuso (FAHP, por sus siglas en inglés) es considerado una extensión del proceso analítico jerárquico, es una combinación del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) con Lógica Difusa (Fuzzy Logic, por sus siglas en inglés) -*En el Anexo D se presenta con detalle la teoría de Lógica Difusa-*, donde se tiene en cuenta la teoría de los conjuntos difusos y sus funciones de pertenencia con el fin de determinar el peso de los criterios del problema en evaluación. En FAHP, las comparaciones pareadas de los criterios y las alternativas se realizan a través del uso de variables lingüísticas, que están representadas por números triangulares[26]. Una de las primeras aplicaciones difusas de AHP fue realizada por Van Laarhoven y Pedrycz en 1983[26], [30], donde se definieron las funciones de pertenencia triangular para las comparaciones por pares. Luego en 1985, Buckley determinó la importancia relativa de los pesos de los criterios y alternativas con valores de pertenencia difusos[26], [31]. El proceso de Buckley será seguido en esta tesis, para encontrar los pesos normalizados tanto de los criterios sobre cada alternativa. Este proceso consta de los siguientes pasos:

Paso 1. El decisor o grupo de decisores compara los criterios o alternativas a través de los términos lingüísticos mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 7 Fuente: Ayhan, M. 2013 y Thomas Saaty, 2001. Escala difusa de comparación pareada.

Intensidad de importancia	Definición	Explicación	Escala triangular difusa
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.	(1,1,1)
2	Preferencia entre igual y moderada		(1,2,3)
3	Preferencia débil o moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.	(2,3,4)
4	Preferencia entre moderada y fuerte		(3,4,5)
5	Preferencia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.	(4,5,6)
6	Preferencia entre fuerte y extrema		(5,6,7)

7	Preferencia extrema o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.	(6,7,8)
8	Preferencia entre muy fuerte y absoluta		(7,8,9)
9	Preferencia absoluta	Preferencia clara y absoluta de una actividad sobre otra.	(9,9,9)
1/2	Entre igual y levemente menos importante		(1/3,1/2,1)
1/3	Levemente menos importante	La experiencia y el juicio desfavorecen levemente a una actividad sobre la otro.	(1/4,1/3,1/2)
1/4	Entre leve y notablemente menos importante		(1/5,1/4,1/3)
1/5	Notablemente menos importante	La experiencia y el juicio desfavorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.	(1/6,1/5,1/4)
1/6	Entre notable y fuertemente menos importante		(1/7,1/6,1/5)
1/7	Fuertemente menos importante	Una actividad es mucho más desfavorecida que la otra; su debilidad se demostró en la práctica.	(1/8,1/7,1/6)
1/8	Entre fuerte y extremadamente menos importante		(1/9,1/8,1/7)
1/9	Extremadamente menos importante	La debilidad frente al otro criterio/alternativa es clara y absoluta.	(1/9,1/9,1/9)

Una vez determinados estos criterios, se forma una matriz $n \times n$ que contiene comparaciones en función de la importancia de cada criterio teniendo en cuenta la escala de Saaty difusa, donde \tilde{a}_{ij}^k indica la preferencia de i^{th} criterios sobre j^{th} criterios de k^{th} decisores.

$$\tilde{X}^k = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11}^k & \dots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1}^k & \dots & \tilde{a}_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (6)$$

Paso 2. Si hay más de un decisor, se realiza un promedio con la preferencia \tilde{a}_{ij}^k de cada uno:

3- Definición de la metodología de análisis

$$\tilde{a}_{ij}^k = \frac{\sum_{k=1}^K \tilde{a}_{ij}^k}{K} \quad (7)$$

Paso 3. Luego de promediar las preferencias de los criterios, se arma la matriz de comparación pareada difusa con la que se calcularán las ponderaciones:

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Paso 4. Se calcula el vector de preferencias difuso, usando la media geométrica de los valores difusos de los criterios:

$$\tilde{r}_i = [\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}]^{1/n}; \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Paso 5. Se determinan los pesos de cada criterio con los siguientes pasos:

Paso 5.1. Determinar la suma por filas del vector \tilde{r}_i , donde $\tilde{r}_i = (l_i, m_i, u_i)$:

$$\tilde{z}_i = \sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \quad (10)$$

Paso 5.2. Determinar el inverso de \tilde{z}_i , como nuestro conjunto difuso está definido solo sobre \mathbb{R}^+ :

$$\tilde{z}_i^{-1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (11)$$

Paso 5.3. Se determinan los pesos difusos multiplicando el vector difuso de preferencias del Paso 4 (\tilde{r}_i) por el inverso de \tilde{z}_i

$$\begin{aligned} \tilde{w}_i &= \tilde{z}_i^{-1} * \tilde{r}_i \\ \tilde{w}_i &= (lw_i, mw_i, uw_i) \end{aligned} \quad (12)$$

Paso 6. Como el peso sigue siendo un número triangular difuso, en este paso defusificará utilizando el método centro de gravedad [32], debido a que es uno de los más utilizados (ver anexo D):

$$\begin{aligned} COG(A) &= \frac{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} x A(x)}{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} A(x)} \\ M_i &= \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \end{aligned} \quad (13)$$

Paso 7. Normalizar el valor de M_i :

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (14)$$

Paso 8. Multiplicar los pesos de los criterios (vector propio de la matriz de comparación pareada de criterios versus criterios) por los vectores propios alternativas (como en AHP, se comparan las alternativas entre sí, teniendo en cuenta cada criterio).

3.3.1 Consistencia de las matrices de comparación pareadas

Para determinar la consistencia de las matrices de comparaciones pareadas, en esta tesis, se tendrá en cuenta los métodos de columnas normalizadas con promedio de filas difusas: con normalización y división difusa [33] por su eficiencia, simplicidad y parecido con la forma en que Saaty calcula la consistencia de estas matrices. Además, para optimizar la consistencia de estas matrices se propone un algoritmo genético.

El método consta de los siguientes pasos:

Paso 1. Normalizar la matriz de comparación pareada (Ver anexo F, para una revisión bibliográfica más profunda sobre normalización):

Sea la matriz de comparación pareada $\tilde{X} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$, su normalización se calcula de la siguiente forma:

$$\tilde{a}_{ij}^* = l_{ij}^*, m_{ij}^*, u_{ij}^* = \frac{\tilde{a}_{ij}}{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij}} \cong \left(\frac{l_{ij}}{\sum_{i=1}^n l_{ij}}, \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} \right) \quad (15)$$

Paso 2. Hallar el vector de pesos de los criterios (promedio de filas de la matriz normalizada):

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij}^*}{N} \cong \left(\frac{\sum_{i=1}^n l_{ij}^*}{N}, \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij}^*}{N}, \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^*}{N} \right) \quad (16)$$

Paso 3. Calcular un valor propio difuso aproximado, considerando la siguiente versión difusa del problema del vector propio $\tilde{X}W = \lambda W$

Ahora, llamemos P a $\tilde{X}W$, entonces $P = \tilde{X}W$. Así,

3- Definición de la metodología de análisis

$$P_i = \sum_{j=1}^N \tilde{\alpha}_{ij} * W \cong \left(\sum_{j=1}^N l_{ij}w_{jl}, \sum_{j=1}^N m_{ij}w_{jm}, \sum_{j=1}^N u_{ij}w_{ju} \right) \quad (17)$$

Como $P = \tilde{X}W$, se puede decir que $P_i \cong \lambda_i * W_i$

Paso 4. Hallar λ , dividiendo a P por el vector de criterios del punto 2 (W):

$$\lambda = \lambda_{il}, \lambda_{im}, \lambda_{iu} = \left(\frac{\sum_{j=1}^N l_{ij}w_{jl}}{w_{jl}}, \frac{\sum_{j=1}^N m_{ij}w_{jm}}{w_{jm}}, \frac{\sum_{j=1}^N u_{ij}w_{ju}}{w_{ju}} \right) \quad (18)$$

Nota: el método empleado enfatiza que los resultados de la ecuación anterior no se obtienen mediante la división difusa, como se puede observar.

Luego, el valor propio difuso está dado por:

$$\lambda_i = \lambda_{il}, \lambda_{im}, \lambda_{iu} \cong \left(\sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{il}}{N}, \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{im}}{N}, \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{iu}}{N} \right) \quad (19)$$

Paso 5. Como el valor de λ sigue siendo un número triangular difuso, en este paso desfusificará utilizando el método centro de gravedad [32]:

$$\lambda_{max} = \frac{\lambda_{il} + \lambda_{im} + \lambda_{iu}}{3} \quad (20)$$

Paso 6. Calcular el índice de consistencia (IC) y radio de consistencia (RC), tal como se explica en el anexo del proceso analítico jerárquico (AHP).

El siguiente paso se propone como un mejoramiento al cálculo de la consistencia de las matrices difusas:

Paso 7. Si el radio de consistencia es mayor que 0.1 y menor que 0.6, la consistencia se optimiza mediante un algoritmo genético (GA, por sus siglas en ingles). En el Anexo E se presenta con detalle el algoritmo genético propuesto en esta tesis.

$$Fitness = \log \left(\frac{1}{1 + 10^{-11} + CR + (distancia * 0.5)} \right) \quad (21)$$

3.3.2 Flujo sintetizado del método FAHP+GA

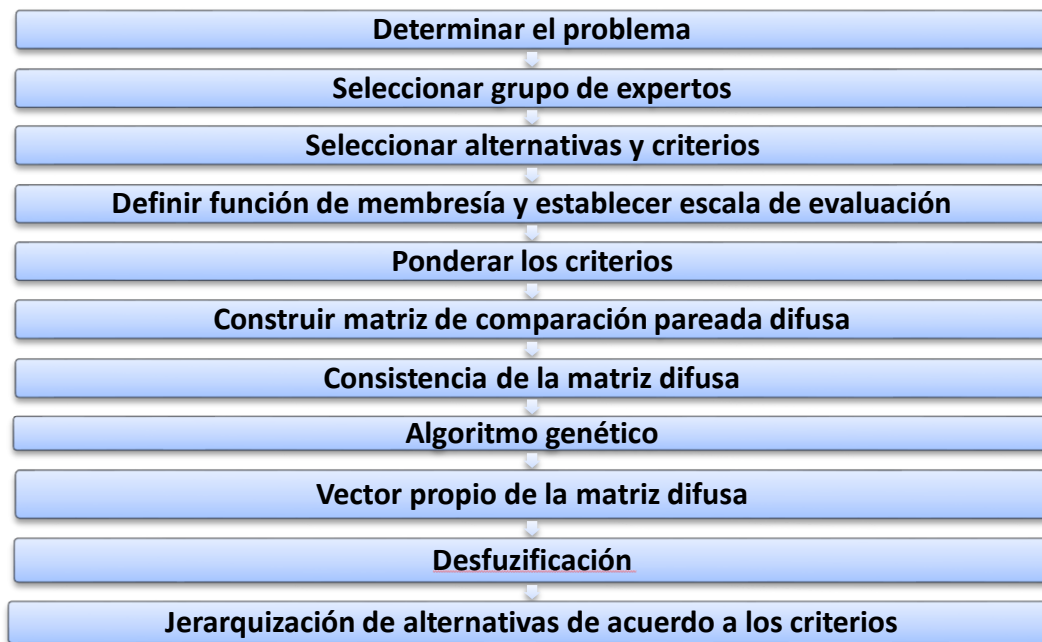


Figura 9. Algoritmo sintetizado del método AHP difuso [26] con Algoritmo genético.

4. Propuesta de modelo FAHP-GA+TOPSIS para la selección de tratamientos EOR

4.1 Descripción del problema

Ante la gran complejidad de los procesos de recobro mejorado, la etapa de planeación se enfrenta a distintos retos a la hora de seleccionar la tecnología y los tratamientos químicos a utilizar, debido a la incertidumbre asociada a los parámetros de entrada a los distintos modelos.

Desde el punto de vista de la gestión de proyectos de EOR el alto coste, la implicación medioambiental, el efecto sobre la sociedad y la dificultad de posteriores modificaciones, exigen múltiples niveles de control y supervisión sobre los decisores y/o actores directos, los cuales deben llegar a consenso para poder utilizar los recursos en un proyecto determinado.

Se han planteado diferentes métodos de tomas de decisiones estratégicas en recobro mejorado para establecer escenarios posibles y evaluarlos. En el estado del arte se encuentran documentos como:

“Screening of enhanced oil recovery techniques for Iranian oil reservoirs using TOPSIS algorithm” presentado por Khojastehmehr, M., Madani, M., Daryasafar, A. en 2019, el cual divulga el uso de TOPSIS para seleccionar el tipo de técnica a utilizar: química, térmica, gaseosa o microorgánica. El método de selección se empleó para 10 técnicas diferentes de EOR utilizando una amplia gama de propiedades y condiciones. La importancia relativa de los parámetros del yacimiento se determinó según el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Los hallazgos mostraron que, entre los parámetros de detección considerados, para

determinar la mejor técnica EOR, la litología del reservorio es el parámetro que más influye[34]. Este método tiene la desventaja de que al usar AHP, la ponderación es discreta, generando incertidumbre. El método el AHP convencional falla al tratar con la imprecisión o subjetividad del juicio humano y con los múltiples criterios, debido a que la comparación por pares es hecha usando una escala de nueve puntos, y aunque esta escala discreta de uno a nueve es simple y fácil de usar, no tiene en cuenta la incertidumbre asociada a los juicios humanos o los términos lingüísticos que los decisores usan para expresar sus sentimientos o juicios subjetivos[35].

Otro documento encontrado en la literatura que aborda este tipo de problemas es “*Novel Enhanced-Oil-Recovery Decision-Making Work Flow Derived From the Delphi-AHP-TOPSIS Method: A Case Study*” presentado por Liang et al. en 2018, el cual divulga un método de selección para recobro mejorado utilizando Delphi-AHP-TOPSIS identificando criterios de evaluación para la clasificación final de los candidatos, en este trabajo se tuvieron en cuenta criterios y subcriterios económicos, de yacimientos, criterios de la simulación numérica y riesgos. Delphi se utiliza para identificar los criterios de evaluación, AHP para la influencia de los criterios e identificar la prioridad relativa de factores y subfactores y finalmente, TOPSIS para la clasificación final de los candidatos[1]. Este método al igual que la anterior tiene la desventaja de la utilización del AHP convencional.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el área de selección de los tratamientos químicos para procesos de recobro mejorado, no se ha profundizado cuál o cuáles de los actuales modelos de toma de decisiones pueden aplicarse de una manera confiable y ajustada a los casos. Así, el propósito de este trabajo es identificar los criterios que deben considerarse para seleccionar alternativas de tratamientos químicos para EOR, como son criterios que involucran la complejidad de la implementación, impacto en la producción, impactos sociales y ambientales. Además de estudiar la pertinencia de la utilización de métodos de análisis multicriterio para apoyar estos procesos de decisión.

Esta propuesta es parte del proyecto Plan nacional para el potenciamiento de la tecnología CEOR con gas mejorado químicamente, donde en el problema de decisión de seleccionar la combinación óptima químico-fluido para EOR, se pueden enumerar las alternativas y no cambian durante el análisis, las características cuantitativas y cualitativas de las

4- Propuesta de modelo FAHP-GA+TOPSIS para la selección de tratamientos EOR

alternativas (criterios de decisión) se pueden acoplar y el ambiente donde se toma la decisión está determinado. Por ende, se puede clasificar como un problema de decisión discreto, el cual puede ser analizado y solucionado por métodos MCDA. Otro aspecto importante a resaltar en este proceso es que las partes interesadas podrán definir sus preferencias de forma más sencilla a la hora de seleccionar de forma objetiva la mejor combinación químico-fluido a utilizar en un campo determinado, esto debido a que el problema se podrá descomponer en situaciones más simples de ponderar. Además, se podrá tener en cuenta la incertidumbre asociada a dicha ponderación y la aversión al riesgo de los involucrados.

En este capítulo se desarrollará el caso de selección de la mejor alternativa químico-fluido a utilizar en un campo colombiano en la etapa de planeación de un proceso de recobro mejorado, para el cual utilizaremos 9 alternativas y 10 criterios. Por practicidad no se profundiza en la naturaleza de los químicos utilizados como alternativas, el objetivo será aplicar el método FAHP-TOPSIS para priorizar estas 9 alternativas disponibles de mejora, según la preferencia y criterios de los decisores; es decir, se pretende únicamente probar la accesibilidad del método

4.2 Proceso de toma de decisiones FAHP-TOPSIS

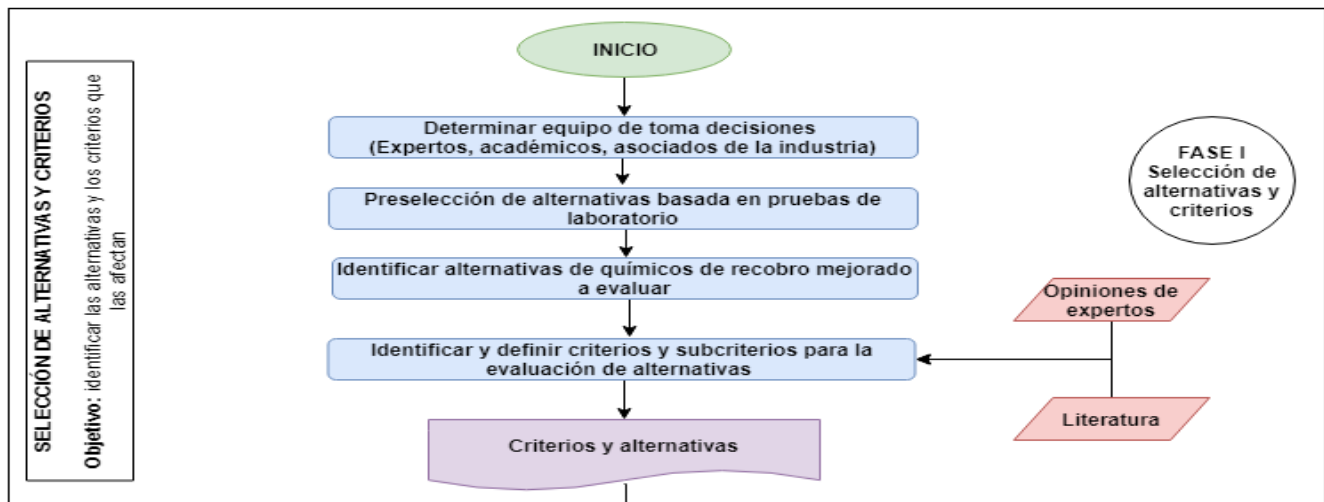
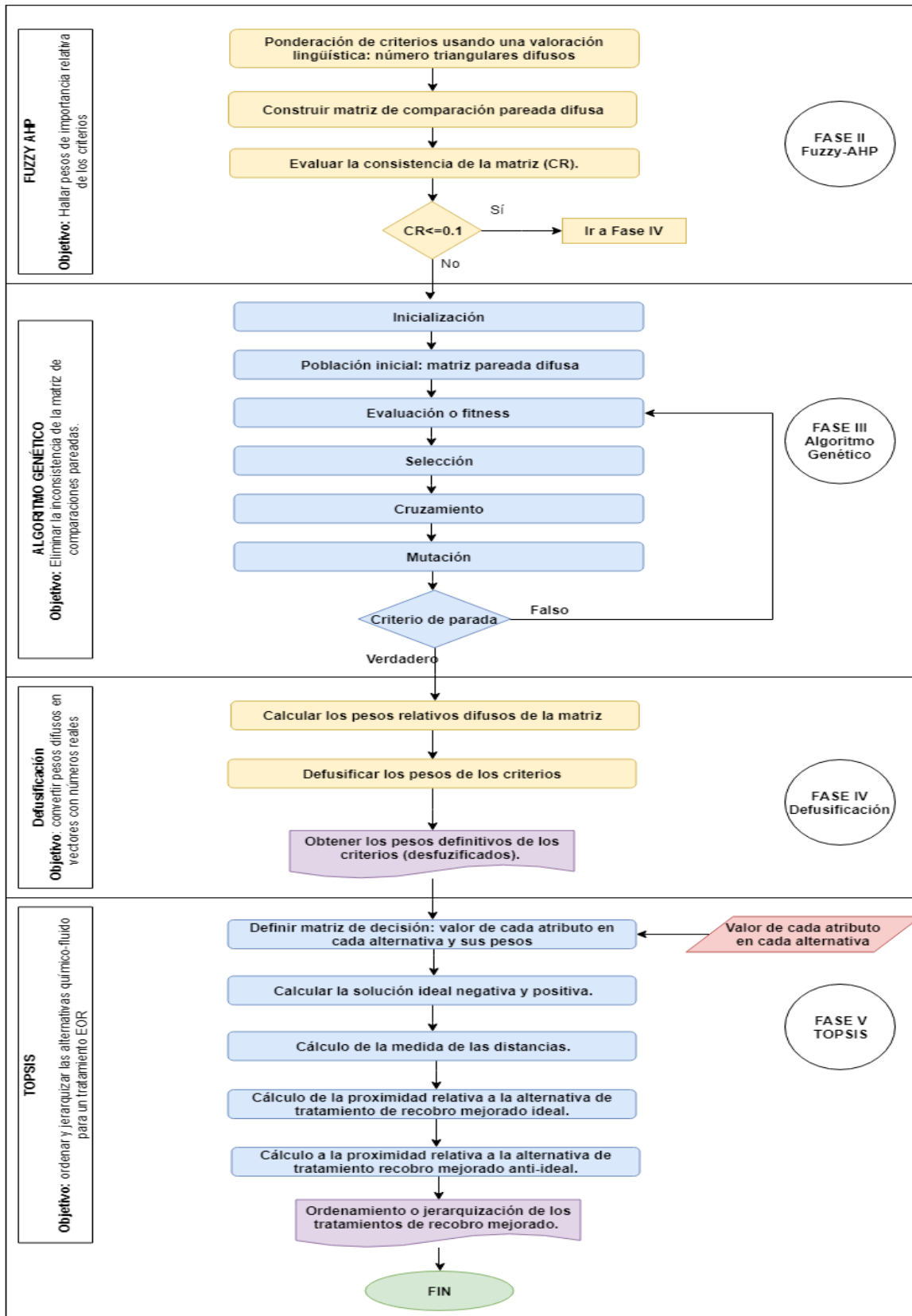


Figura 10 Algoritmo del proceso de selección Fuzzy AHP-TOPSIS- (Parte1). En el gráfico anterior los recuadros en rojo representan las entradas del modelo, los amarillos representan la parte difusa de la metodología, los azules la parte no difusa y los morados son los resultados de cada etapa del modelo.

Figura 11 Algoritmo del proceso de selección Fuzzy AHP-TOPSIS(Parte2). En el gráfico anterior los recuadros en rojo representan las entradas del modelo, los amarillos representan la parte difusa de la metodología, los azules la parte no difusa y los morados son los resultados de cada etapa del modelo.



4.3 Identificación de alternativas

- **Gas de recicló:** gas producido en un campo que se reinyecta con fines de mantener la presión en el yacimiento como metodología de recobro secundario. Mediante agentes químicos dispersos, es posible usarlo como fluido de acarreo para mejorar las propiedades del yacimiento [36].
- **Dióxido de carbono (CO₂):** es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono, también denominado anhídrido carbónico. Se presenta en todas las formas físicas: gas, líquido, sólido[37]
- **Flue-gas:** también llamado gas de escape o gas de chimenea. Es el gas que emanan las plantas de combustión a través de una chimenea, y que puede contener aire de combustión y sustancias residuales como partículas (polvo), óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. [38]
- **EC6002A-NALCO (DANY - Disolución de Asfaltenos a Nivel de Yacimiento):** Surfactante para la remoción de banco condensado. Es un aditivo vendido por la empresa NALCO como un tipo de químico para campos petroleros [39].
- **Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante:** Una nanopartícula es una partícula que posee dimensiones del orden de 10^{-9} m. Las nanopartículas de sílice tienen alta capacidad adsorber asfaltenos, que es la fracción más pesada del crudo. Las nanopartículas de sílice tienen como función modificar la humectabilidad de la roca y ocasionar un aumento en el factor de recobro. Estas nanopartículas pueden ser recuperadas durante la etapa de producción debido a que poseen propiedades magnéticas[40].
- **Nanocápsulas (NC) S20:** son partículas que tienen encapsulado el componente Span 20, el cuál es un surfactante. Las NC se sintetizan mediante el método de nanoprecipitación o difusión del solvente usando como agente encapsulante resinas extraídas de un crudo extrapesado. La síntesis de nanocápsulas permite la reducción del proceso de adsorción de surfactante sobre los medios porosos en

procesos EOR. La geometría esférica de las NC para Span 20 encapsulado son de 71 y 120 nm [41].

Tabla 8. Alternativas a evaluar. Combinaciones fluido-químico.

Fluido	+	Químico	
Gas de reciclo	+	Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	A1
CO ₂	+	Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	A2
Flue-Gas	+	Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	A3
Gas de reciclo	+	DANY	A4
CO ₂	+	DANY	A5
Flue-Gas	+	DANY	A6
Gas de reciclo	+	Nanocápsulas S20 NC	A7
CO ₂	+	Nanocápsulas S20 NC	A8
Flue-Gas	+	Nanocápsulas S20 NC	A9

4.4 Selección de criterios

La identificación de criterios es un proceso dinámico que depende de la adecuada selección del grupo de personas con conocimientos y experiencia sobre el tema específico a evaluar.

La selección de criterios se realizó mediante distintas retroalimentaciones con un grupo de expertos: la primera tuvo como objetivo revisar metodologías de trabajo de la empresa asociada al proyecto Plan nacional para el potenciamiento de la tecnología CEOR con gas mejorado químicamente, identificar las alternativas y los criterios generales relacionados con los diversos componentes del tema en estudio. La segunda reunión, tuvo como propósito analizar y clasificar diferentes sub-criterios dentro de los criterios generales teniendo en cuenta las diferentes alternativas a evaluar. La tercera ronda se realizó con el fin de definir las escalas semi-cuantitativa para varios criterios, esta escala se describe con el fin de determinar las acciones que pueden afectar positiva o negativamente el cumplimiento de los propósitos de un criterio.

En la Figura 12, se ilustra la metodología que se implementó para identificar y seleccionar los diferentes criterios y alternativas a evaluar. Los criterios se dividieron en 4 categorías generales para evaluar 9 alternativas, ya que para el caso de estudio y según la

4- Propuesta de modelo FAHP-GA+TOPSIS para la selección de tratamientos EOR

experiencia de los expertos, son los factores que tienen mayor incidencia en la selección de tratamientos químicos en la etapa de planeación en proyecto petrolero.

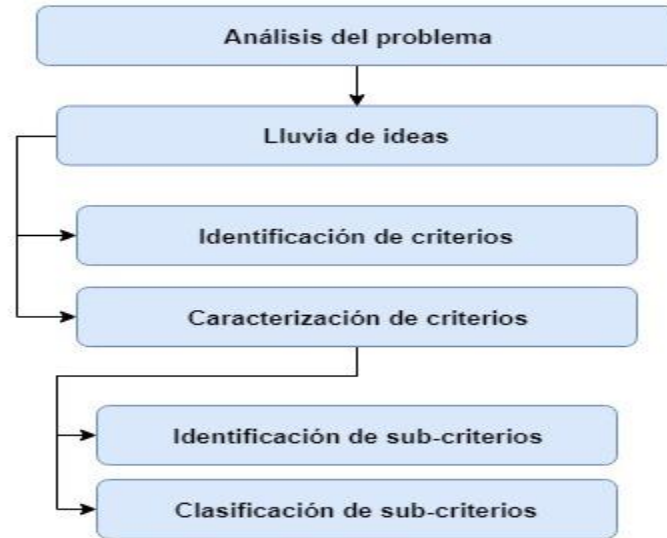


Figura 12. Metodología para identificar y seleccionar los criterios.

Una vez se han seleccionado los criterios, se deben ponderar y luego se debe tener en cuenta la valoración respectiva de cada uno de ellos, para esto, como se mencionó anteriormente, se planteó una escala semi-cuantitativa que tiene en cuenta los posibles riesgos, consecuencias e impactos de cada uno de los criterios sobre las alternativas del proyecto. Así, se podrá medir la magnitud de dichos impactos en el transcurso de las etapas del proyecto.

En la parte cualitativa de la escala semi-cuantitativa se tienen en cuenta los siguientes valores lingüísticos: Alto, medio, bajo, muy bajo, a fin de poder evaluar los criterios. Estos, se pueden representar también mediante una matriz de colores, que refleja el nivel de gravedad en el impacto de los criterios sobre las distintas alternativas. Este tipo de ilustración de los factores permite apreciar la influencia de ciertos criterios sobre el proyecto y por ende se podría determinar sobre cuáles se deberá realizar una medición más precisa.

Así, teniendo en cuenta que no todos los criterios identificados son críticos, ni a todos se les debe prestar el mismo nivel de atención, se tienen en cuenta los siguientes pasos a la hora de definir sus respectivos impactos en la escala lingüística:

- Definir adecuadamente las alternativas a analizar.

- Estimar las consecuencias o impactos potenciales de los criterios sobre las alternativas.
- Estimar la probabilidad de ocurrencia de las consecuencias de los criterios.

La otra parte del análisis semi-cuantitativo son los valores numéricos que se le asignan a las escalas lingüísticas de la matriz, esto se realiza debido a que la escala cualitativa carece de exactitud a la hora de valorar los criterios, lo cual dificulta la calificación en la Fase III: TOPSIS. En esta parte del proceso se realiza la valoración semi-cuantitativa del criterio de acuerdo con su impacto y probabilidad de ocurrencia. En la Tabla 9, se muestra la escala semi-cuantitativa propuesta en este trabajo de investigación.

Tabla 9. Valoración semi-cuantitativa

Valoración	
Alto	100
Medio	50
Bajo	20
Muy bajo	5

Los criterios seleccionados se encuentran agrupados en cuatro definiciones generales, las cuales se explican a continuación:

4.4.1 Impacto en la producción (CG1)

Este factor se toma en cuenta desde dos perspectivas: costo y beneficio. El factor de recobro y el tiempo de recuperación de la inversión indican el beneficio potencial del proyecto EOR. En cuanto al costo, que es primordial en la toma de decisiones, el factor incluye el VPN el cual incluye aspectos como la inversión de capital inicial, los impuestos, la depreciación, el costo del químico, costos operativos, etc.

Los factores que componen el impacto en la producción se escogieron debido a que, en un proyecto de cualquier tipo, los grandes gastos económicos son los que por lo general obstaculizan en gran medida el progreso de la implementación del mismo. Por ende, este ejercicio contribuye a la identificación de posibles situaciones críticas derivadas de los factores que impactan la producción, lo cual podría ayudar a formular anticipadamente estrategias encaminadas a minimizar los riesgos asociados a estas situaciones. Los factores asociados a este componente se califican de manera cuantitativa.

- **Factor de recobro (%) (C1):** Cantidad recuperable de hidrocarburos después de aplicar la técnica, normalmente expresada como un porcentaje [42]. Entre más alto sea este criterio es mejor para el proyecto.
- **VPN (USD) (C2):** valor presente neto, es un procedimiento que calcula el valor presente a partir de una evaluación de flujo de caja futuros, generados por una inversión [42]. Entre más alto sea este criterio es mejor para el proyecto.
- **TIR (USD) (C3):** La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad de una inversión representa los rendimientos futuros esperados de una inversión [42]. Entre más alto sea este criterio es mejor para el proyecto.

4.4.2 Complejidad de implementación (CG2)

Estos parámetros implican la comprensión del planeamiento de la operación, teniendo en cuenta aspectos como la madurez de la tecnología, la disponibilidad de mano de obra calificada, la incertidumbre asociada a los posibles productos químicos a utilizar y otros factores importantes como los requisitos logísticos que pueden afectar las decisiones en el proceso de recobro mejorado.

Normalmente, los proyectos pilotos de recobro mejorado implican una alta incertidumbre, por ende, es necesario analizar y entender las posibles complejidades que se pueden presentar durante la implementación de los mismos. Además, un buen análisis ayuda a los ingenieros a justificar la viabilidad del proyecto EOR. Los factores asociados a este componente se califican de manera semi-cuantitativa.

- **Madurez de la tecnología (C4):** este criterio hace referencia al conocimiento que se tiene del desempeño de la alternativa, la complejidad para usar la tecnología y si ésta se encuentra dentro del alcance económico del proyecto. Entre más alto sea el valor de este criterio es mejor para el proyecto.

Escala semi-cuantitativa

Alto: sistema completo y probado.

Medio: validación tecnológica en el entorno pertinente (piloto).

Bajo: validación tecnológica en el laboratorio.

Muy bajo: formulación del concepto tecnológico.

- **Complejidad manejo químicos en superficie (inyección y producción) (C5):** este factor se refiere al requerimiento de la manipulación de grandes cantidades de compuestos tóxicos, corrosivos y/o inflamables. Si requiere condiciones especiales de almacenamiento, también se debe tener en cuenta si las condiciones ambientales hacen que aumente el riesgo de derrame y/o evaporación de sus componentes. Entre más bajo sea el valor de este criterio es mejor.

Escala semi-cuantitativa

Alto: la cantidad a manipular de compuestos tóxicos, corrosivos e inflamables es alta. Además, se necesitan condiciones especiales de almacenamiento y las condiciones ambientales aumentan el riesgo de derrame y/o evaporación de los químicos.

Medio: la cantidad a manipular de compuestos tóxicos, corrosivos e inflamables es media. No se necesitan condiciones especiales de almacenamiento y las condiciones ambientales no aumentan el riesgo de derrame y/o evaporación de los químicos.

Bajo: el riesgo de contaminación por compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos es baja. No se necesitan condiciones especiales de almacenamiento y las condiciones ambientales no aumentan el riesgo de derrame y/o evaporación de los químicos.

Muy bajo: no hay riesgo de contaminación.

4.4.3 Criterios ambientales (CG3)

Estos criterios representan el efecto que produce la actividad de recobro mejorado sobre el medio ambiente en un campo específico. Entre estos impactos se encuentran: las dificultades de los procesos de licencias ambientales, impactos sobre el suelo, la emisión de gases efecto invernadero a la atmósfera, etc. Los factores asociados a este componente se califican de manera semi-cuantitativa.

- **Restricciones ambientales adicionales (permisos adicionales) (C6):** Necesidad de requisitos más estrictos o de procesos y equipos adicionales que puedan aumentar los costos iniciales. Entre más bajo sea el valor de este criterio es mejor para el proyecto.

Escala semi-cuantitativa

Alto: la operación requiere muchos permisos adicionales.

Medio: la operación requiere pocos permisos adicionales.

Bajo: la operación requiere edición de permisos ya concedidos.

Muy bajo: la operación no necesita permisos adicionales.

- **Impactos sobre el suelo (C7):** Este criterio hace referencia a la calidad del suelo, parámetros como: PH, cambio en la humedad, grasas y aceites, causados por los residuos de la operación tanto químicos como orgánicos. Entre más bajo sea el valor de este criterio es mejor para el proyecto.

Escala semi-cuantitativa

Alto: en caso de derrame, basado en la cantidad de fluido y químico de inyección, el impacto irreversible.

Medio: en caso de derrame, basado en la cantidad de fluido y químico de inyección, el impacto es a largo plazo o difícil de remediar.

Bajo: en caso de derrame, basado en la cantidad de fluido y químico de inyección, el impacto es fácil de remediar

Muy bajo: en caso de derrame, basado en la cantidad de fluido y químico de inyección, no hay impacto sobre el suelo.

- **Contribución a la disminución de emisiones de CO₂ (C8):** este criterio comprende los alcances de la operación para disminuir la contaminación ambiental debido a las emisiones generadas por la maquinaria utilizada. Se tiene en cuenta si hay captura CO₂, debido a que correspondería a una disminución representativa de CO₂. Entre más alto sea el valor de este criterio es mejor.

Escala semi-cuantitativa

Alto: hay captura de CO₂ y las emisiones de CO₂ disminuyen.

Medio: hay captura de CO₂ y las emisiones de CO₂ quedan igual.

Bajo: no hay captura de CO₂ y las emisiones de CO₂ quedan igual.

Muy bajo: no hay captura de CO₂ y aumentan las emisiones de CO₂.

4.4.4 Criterios sociales (CG4)

Incluyen los estándares de salud, seguridad y las oportunidades de empleo generadas por la operación. Este tipo de factores tienden a descuidarse generalmente en el análisis de la evaluación técnica pura; sin embargo, son factores que pueden retrasar o incluso llevar a la cancelación del plan de recobro mejorado en la zona, independientemente de la factibilidad de la evaluación técnica y/o económica. Los factores asociados a este componente se califican de manera semi-cuantitativa.

- **Generación de empleos directos en la comunidad (C9):** el volumen de trabajadores contratados asociados a la operación de recobro mejorado. Entre más alto sea el valor de este criterio es mejor para el proyecto.

Escala semi-cuantitativa

Alto: se requieren más de 60 trabajadores adicionales por construcción de infraestructura, operarios, personal calificado, etc.

Medio: se requieren entre 10 y 60 trabajadores adicionales por construcción de infraestructura, operarios, personal calificado, etc.

Bajo: se requieren menos de 10 trabajadores adicionales por construcción de infraestructura, operarios, personal calificado, etc.

Muy bajo: no se necesitan trabajadores adicionales.

- **Generación de conflictos legislativos (C10):** existe alguna ley de carácter ambiental, sanitario o de salud humana que no permita el uso de cierto químico o fluido en el subsuelo de la zona donde se desarrolla el proyecto. Entre más bajo sea el valor de este criterio es mejor para el proyecto.

Escala semi-cuantitativa

Alto: se necesitan nuevos espacios o infraestructura que requiere permisos adicionales y conciliación con la población. Se requieren estudios y permisos adicionales para implementar la tecnología y/o se solicitan licencias ambientales adicionales para implementar la tecnología. Se requiere registro del químico.

Medio: se necesitan nuevos espacios o infraestructura que requiere permisos adicionales y conciliación con la población. No se requieren estudios y permisos adicionales para implementar la tecnología y/ licencias ambientales adicionales para implementar la tecnología. Se requiere registro del químico.

4- Propuesta de modelo FAHP-GA+TOPSIS para la selección de tratamientos EOR

Bajo: no se requiere ampliación de la locación, ni permisos adicionales. Se requieren pocos estudios para correcta clasificación de químicos.

Muy bajo: no existe ningún requisito que se deba presentar para la implementación de la alternativa.

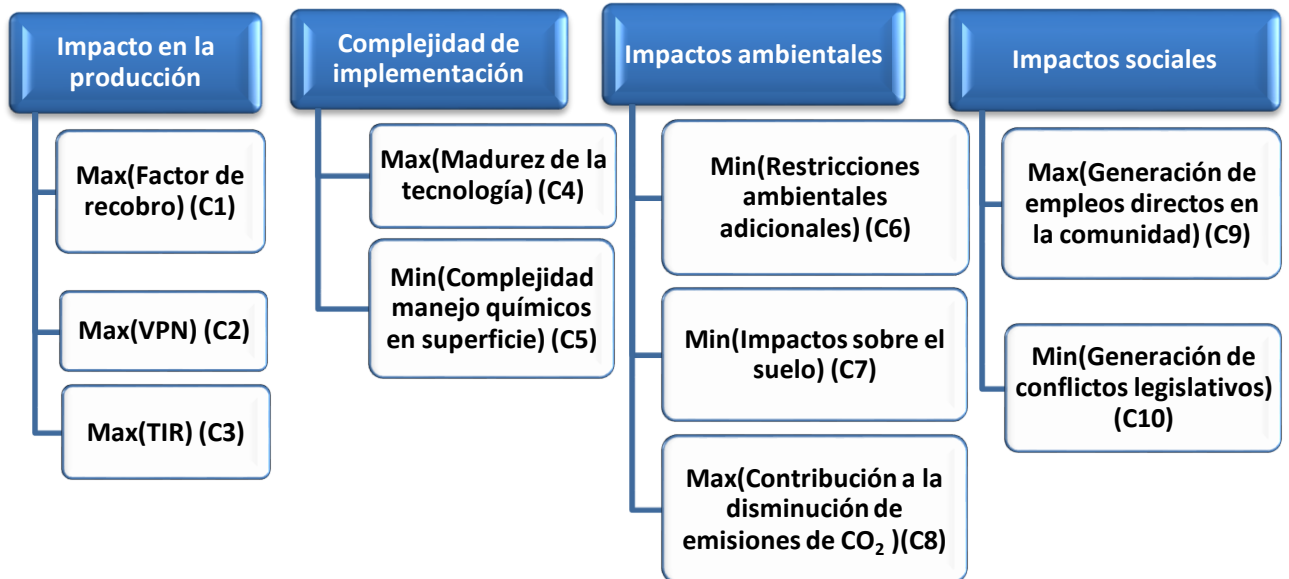


Figura 13. Criterios globales y criterios locales seleccionados para la evaluación de alternativas, con su respectiva orientación hacia la maximización o minimización del criterio.

4.5 Representación gráfica del problema de selección

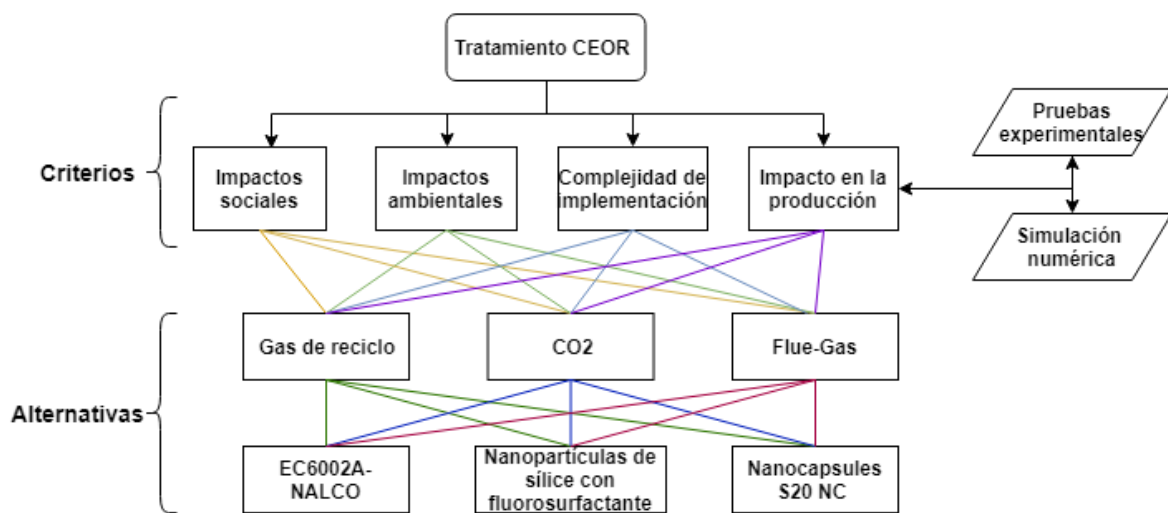


Figura 14. Mapa conceptual de la correlación entre criterios y alternativas.

5. Resultados

5.1 Aplicación de metodología FAHP+GA+TOPSIS en el caso de estudio.

Siguiendo el procedimiento general de la metodología primero se aplicó el proceso analítico jerárquico difuso, donde se evaluaron los criterios propuestos de acuerdo a la experiencia de un grupo de expertos.

En la Figura 15 se puede observar la calificación dada por los diferentes expertos de la importancia de un criterio respecto a otro, a partir de la matriz de comparación pareada. Esta calificación se presenta de acuerdo a la aversión al riesgo de cada uno de los decisores o de su experiencia en un área específica, lo cual sin el uso de técnicas adecuadas podría retardar el desarrollo y progreso de un proyecto petrolero, generando un incremento de los riesgos del mismo si no se toman las decisiones correctas o si no se llega a un consenso adecuado.

En este caso, en los criterios que se presentaron mayores discrepancias, teniendo en cuenta la valoración dada por los expertos, fueron en factor de recobro respecto a los factores: madurez de la tecnología, restricciones ambientales adicionales e impactos sobre el suelo. Asimismo, se presentaron desacuerdos notorios frente a las opiniones de los expertos en el criterio madurez de la tecnología respecto a los factores: impactos sobre el suelo y contribución a la disminución de emisiones de CO₂. Las diferentes valoraciones del valor presente neto respecto a las restricciones ambientales adicionales también presentaron disimilitud entre las opiniones de los expertos (en las Tablas 17-18 del Anexo G se puede observar en detalle los valores de las calificaciones dadas por los expertos).

5- Resultados

Como se puede observar en las ponderaciones de los expertos, la estructura de pensamiento de cada uno de ellos es diferente, por ende, a la hora de tomar una decisión se debe tener en cuenta diferentes enfoques con el fin de balancear las opiniones o juicios expresados, para que la decisión sea consistente con los objetivos de la compañía, la comunidad y el estado.

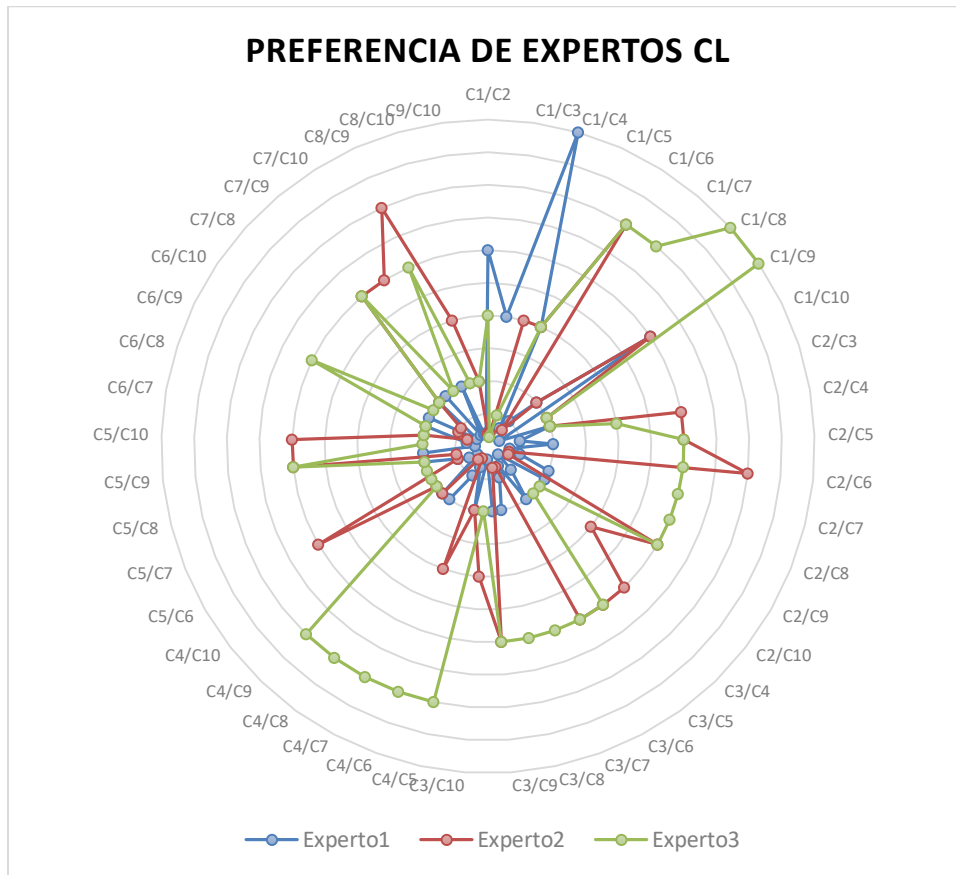


Figura 15 Juicios planteados por los expertos para cada comparación pareada de los criterios locales evaluados, donde la puntuación más alta fue (4,5,6) y la más baja (1/8, 1/7, 1/6). C1= Factor de recobro, C2= VPN, C3=TIR, C4=Madurez de la tecnología, C5=Complejidad manejo de químicos en superficie, C6=Restricciones ambientales adicionales, C7=Impactos sobre el suelo, C8=Contribución a la disminución de emisiones de CO₂, C9= Generación de empleos directos en la comunidad, C10= Generación de conflictos legislativos.

Al igual que en la ilustración anterior, en la Figura 16 se muestra la preferencia de los expertos de un criterio global respecto a otro. En este caso, las comparaciones pareadas que generaron más discrepancias entre los juicios de los expertos fueron los impactos ambientales respecto a los impactos sociales, los impactos en la producción respecto a los

impactos sociales y la complejidad de implementación de la tecnología respecto a los impactos sociales y ambientales.



Figura 16 Juicios planteados por los expertos para cada comparación pareada de los criterios globales evaluados, donde la puntuación más alta fue (2,3,4) y la más baja (1/4, 1/3, 1/2). C1= Impacto en la producción, C2= Complejidad de implementación, C3=Impactos ambientales, C4=Impactos sociales.

Esta evaluación de comparaciones pareadas destaca las consecuencias de las diferentes decisiones, por ende, es fundamental para la transparencia y la calidad de las decisiones que los criterios de decisión sean claramente reconocidos y comunicados en el equipo del proyecto. Si este no es el caso, se corre el riesgo de que, por ejemplo, algunas consideraciones estratégicas no se tengan en cuenta y que los datos o conclusiones no se ajusten a las preferencias de la compañía o los niveles a los que quiera llegar el proyecto.

Una vez obtenidas las calificaciones de los expertos expresadas por medio de valores lingüísticos, éstas se evalúan para determinar las consistencias de los juicios. En este caso en particular, la única matriz que presentó una consistencia mayor al 10% fue la construida a partir de la comparación pareada difusa de los criterios globales.

Para obtener una matriz consistente y dado el número de criterios, se usó un algoritmo genético que se muestra en el Anexo E y cuyo objetivo es minimizar la razón de consistencia y la distancia euclidiana entre la matriz original y la matriz optimizada. En la

5- Resultados

Figura 17 se muestran los resultados de la optimización de la razón de consistencia solo cambiando el valor en un punto (C2-C4), mostrando así la utilidad del uso del algoritmo genético para mejorar la consistencia de la matriz difusa, permitiendo una mejor estimación en la ponderación de los criterios.

Es importante aclarar que teniendo en cuenta el comportamiento de los algoritmos genéticos, la técnica funciona asignando números aleatorios dentro de límites establecidos, por ende, el valor corregido de la quinta comparación (C2-C4) pudo ser un valor mayor al establecido por el algoritmo en esta ocasión, siempre y cuando se cumplan las restricciones de consistencia y distancia. Como es expresado en el Anexo E., los algoritmos genéticos, son técnicas heurísticas de búsqueda y optimización que procesan en cada iteración una población de soluciones potenciales en lugar de una única solución del problema. Esta característica les da a los algoritmos evolutivos una gran ventaja para su uso en la resolución de problemas de optimización multicriterio.

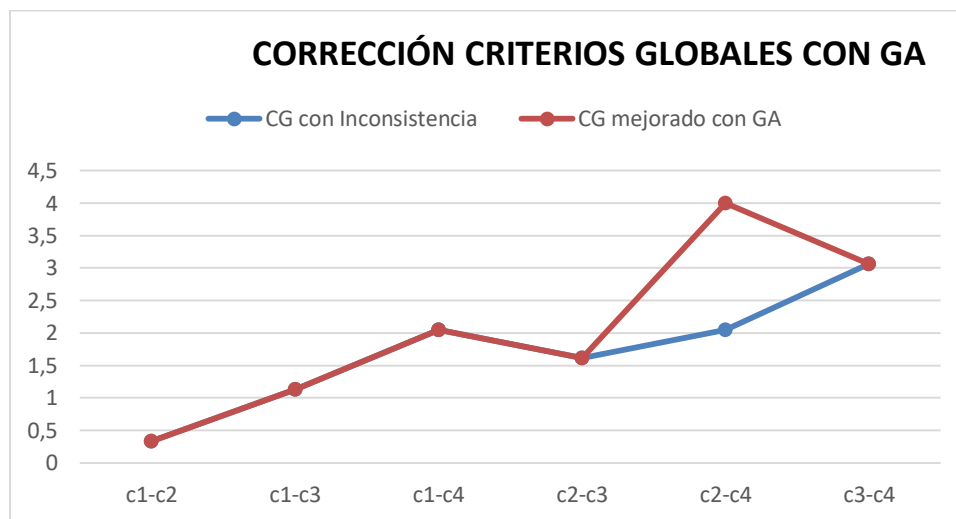


Figura 17. Corrección de la inconsistencia del total (media geométrica) de los juicios planteados por los expertos para la comparación pareada de los criterios globales, mediante el algoritmo genético propuesto. El eje vertical representa las ponderaciones de los expertos, siendo la puntuación más alta, antes de la implementación del GA, (2,3,4) y la más baja (1/4, 1/3, 1/2), generando una consistencia de 0.14. El eje horizontal representa cada comparación pareada realizada. Luego de optimizar las calificaciones con el GA, se cambió la calificación C2 (Complejidad de implementación) sobre C4 (Impactos sociales) de (1,2,3) a (3,4,5), generando una consistencia de 0.07.

En la Figura 18 y 19 se muestran los porcentajes de la ponderación de los criterios globales y locales obtenidos a partir de los juicios de los expertos. Basados en los porcentajes obtenidos, se puede notar que los criterios que afectan la implementación de la alternativa,

seguidos por las posibles afectaciones ambientales, son los factores que más afectan al proyecto EOR en estudio.

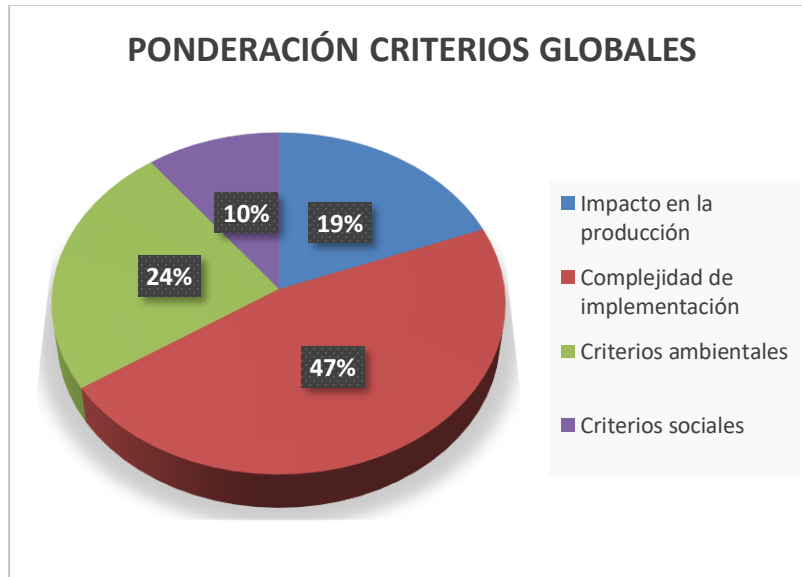


Figura 18 Representación de pesos totales para los criterios globales, con una razón de consistencia de 0.07

En la Figura 19, se muestra la percepción de los decisores respecto a la importancia de los diferentes factores que influyen en un proyecto EOR de acuerdo a su experiencia. El factor de recobro es uno de los criterios más contundentes en un proyecto de recobro mejorado, ya que este representa el porcentaje de crudo que se puede extraer de un pozo respecto a lo que tiene el yacimiento.

PONDERACIÓN CRITERIOS LOCALES

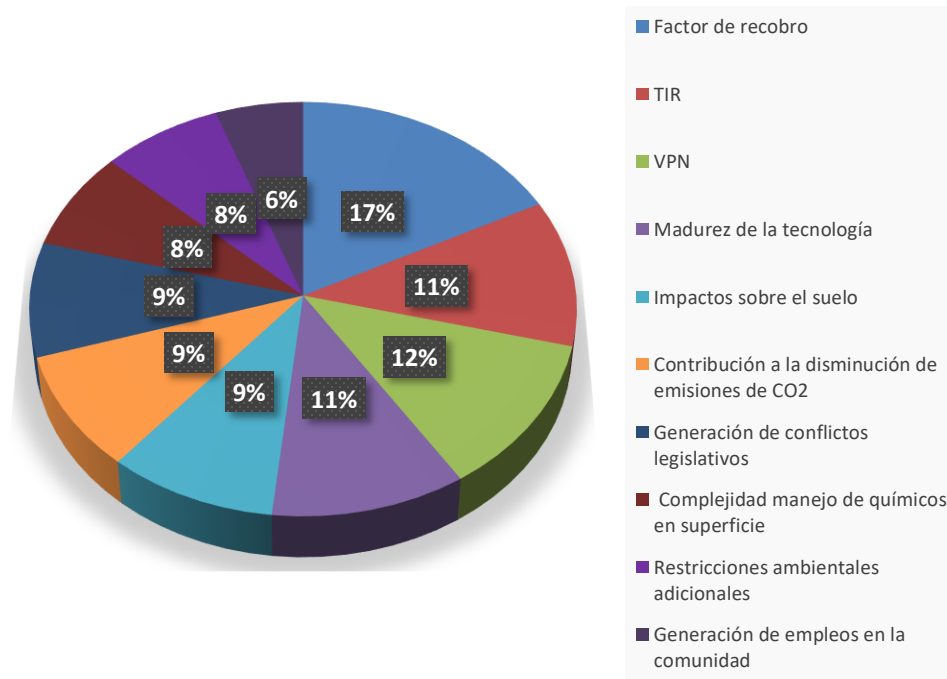


Figura 19 Representación de las pesos de cada sub-criterio o criterio local, con una razón de consistencia de 0.07

Para calcular la prioridad final de los criterios se multiplica la prioridad local (Figura 19, Anexo G - Tabla 19) de un criterio específico por la prioridad asignada al criterio global (Figura 18, Anexo G - Tabla 19) al que pertenece. Los valores finales de las prioridades de los criterios se presentan en la Figura 20.

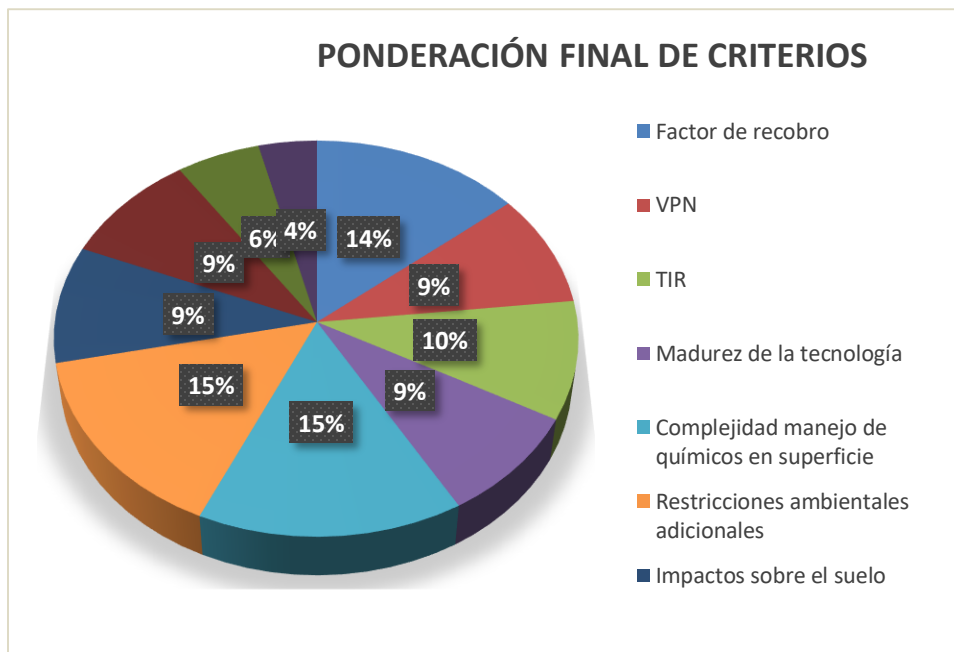


Figura 20 Representación ponderación final de criterios, con una consistencia de 0.071

Una vez ponderados los criterios que afectan al proyecto, se pasa a la etapa de asignación de los valores de las diferentes alternativas teniendo en cuenta cada criterio, para así poder iniciar el proceso de TOPSIS, donde se utiliza además la ponderación de los criterios obtenidos del proceso FAHP (ver Anexo G - Tabla 20).

Teniendo en cuenta estos valores, antes de ingresar al proceso de TOPSIS, se realiza una matriz de consecuencias normalizada que expresa la probabilidad de que una alternativa sea la mejor dependiendo de cada criterio (Tabla 10). Para esta normalización se utilizó la ecuación Lineal max-min mostrada en el Anexo F.

Tabla 10. Matriz de consecuencias normalizada. Elaboración propia.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	0	0,875	0,4375	0,03125	0,96875	0,5625	0,0625	1	0,8125
C2	0	0,526614 593	0,794930 458	0,020884 057	0,577881 909	0,863286 88	0,041768 114	0,594971 014	1
C3	0,692650 334	0	0,585746 102	0,799554 566	0,104677 06	0,723830 735	0,904231 626	0,140311 804	1
C4	0,073174 301	0	0,073174 301	1	0,365871 506	0,512220 108	0,292697 205	0,146348 602	0,219522 904
C5	1	0	0	0,099639 856	1	1	0	0	0
C6	0,785729 591	1	1	0	0,428540 819	0,428540 819	0,428540 819	0,642811 228	0,642811 228
C7	1	1	1	0	0	0	0	0,374953 131	0,374953 131
C8	0	1	0,444444 444	0,055555 556	1	0,444444 444	0,055555 556	1	0,444444 444
C9	0	1	1	0,214270 409	1	1	0,214270 409	1	1
C10	0,545404 963	1	1	0	0,727297 518	0,727297 518	0,545404 963	1	1

5- Resultados

A partir de esta matriz, se plantea un análisis de valor (Figura 21) para determinar si existe una alternativa dominante; es decir que todos sus valores normalizados respecto a cada criterio den el valor de uno.

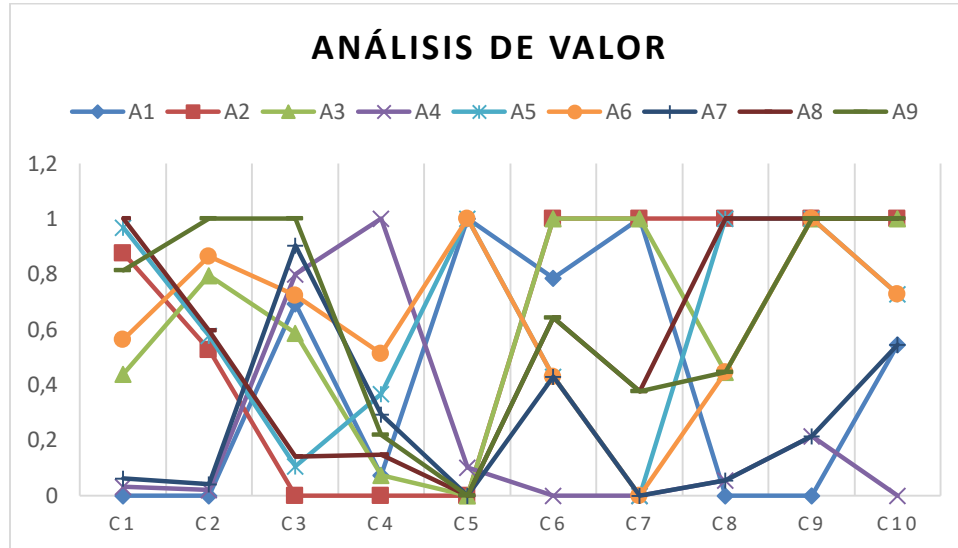


Figura 21 Análisis de valor para las alternativas de acuerdo a los criterios.

Como se puede observar en la Figura 21, entre las alternativas analizadas no existe una que sea la mejor en todos los casos a simple vista, en otras palabras, no hay dominancia de una alternativa sobre las demás. Por lo tanto, es válido utilizar métodos de ordenación de alternativas como TOPSIS.

Finalmente, en la Tabla 11, se puede observar la jerarquización o *ranking* de las alternativas consideradas en el estudio, después de utilizar TOPSIS con los pesos provenientes de FAHP. La alternativa óptima seleccionada para un campo petrolero colombiano específico es CO₂ + EC6002A-NALCO, seguida por el Gas de reciclo + EC6002A-NALCO. Además, se puede observar en la tabla que la puntuación obtenida de las opciones 1-3, no son muy diferentes unas de otras.

Tabla 11. Jerarquización de alternativas después de aplicar TOPSIS usando los pesos obtenidos de Fuzzy AHP

Ranking	Alternativa	Valoración
1	CO ₂ + EC6002A-NALCO	0.615
2	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO	0.582
3	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	0.575
4	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	0.516

5	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	0.467
6	CO₂+ Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.409
7	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	0.388
8	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.327
9	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.120

Las Figuras 22 y 23 representan la jerarquización final de las alternativas usando la metodología descrita en el capítulo 4. Donde la alternativa peor clasificada, fue el Gas de reciclo con Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante; esto pudo suceder debido a que obtuvo el menor valor de factor de recobro dentro de las pruebas de laboratorio y a la carencia de estudios sobre los efectos de las nanopartículas de sílice con fluorosurfactantes, lo que generó para esta alternativa una calificación, por parte de los expertos, opuesta a la requerida para alcanzar el objetivo de los criterios de factor de recobro, complejidad manejo de químicos en superficie y restricciones ambientales adicionales. Esto debido a que, según los expertos, esta combinación químico-fluido, puede conllevar a restricciones ambientales a la hora de su aplicación en un campo petrolero. Además, se debe tener en cuenta que los 3 criterios mencionados alcanzaron la mayor prioridad a nivel de ponderación general dentro de las calificaciones dadas por los expertos, por ende, su grado de influencia sobre la decisión es alto.

En estas figuras también se puede observar que la mejor clasificada después de la aplicación de técnicas multicriterio como FAHP y TOPSIS, es CO₂ + EC6002A-NALCO, esta alternativa tiene el segundo porcentaje de factor de recobro más alto, lo cual la hace altamente elegible, además de que los valores en los demás criterios se acercan al objetivo de ser máximos o mínimos, dependiendo del requerimiento planteado.

5- Resultados

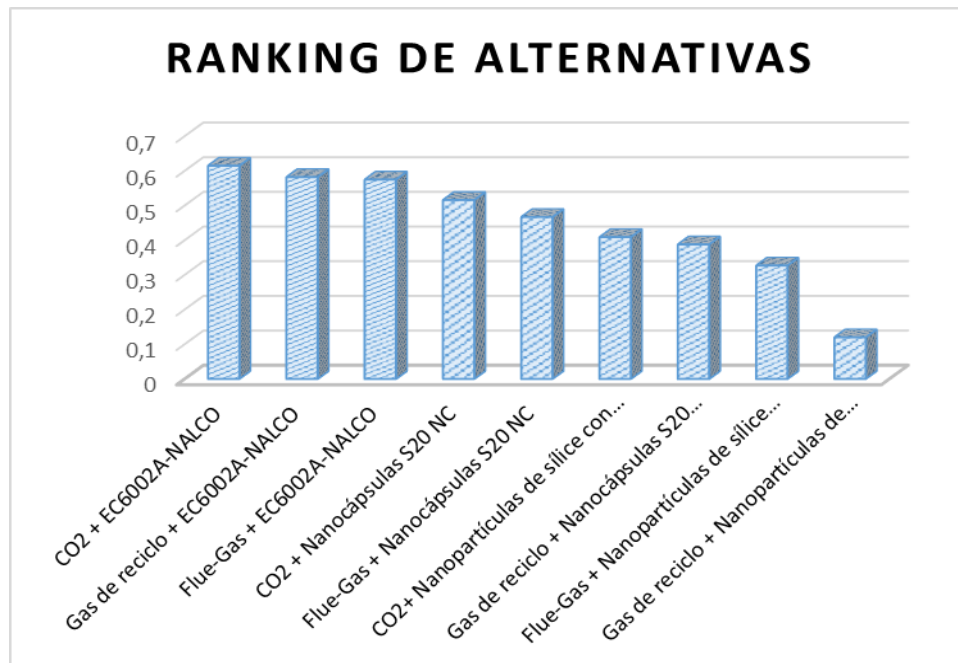


Figura 22 Representación gráfica del ordenamiento de las alternativas

En la Figura 23, se comprueba una vez más la cercanía entre las 3 primeras alternativas; es decir, es necesario realizar un análisis de sensibilidad para ver cuánto afectan las ponderaciones de los criterios a cada una de las alternativas, debido a que un buen resultado es una situación futura que comparamos en relación con otras posibilidades. Así, una buena decisión es una acción que tomamos que es lógicamente consistente con las alternativas que percibimos, la información que tenemos y las preferencias que sentimos.

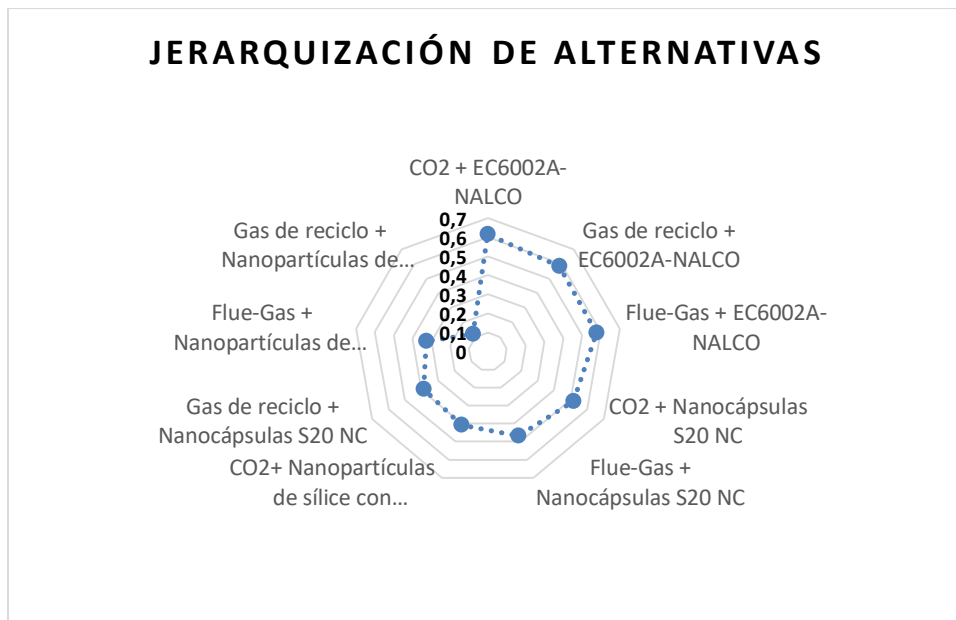


Figura 23 Gráfico radial de la alternativa más óptima a la menos óptima

5.2 Análisis de sensibilidad

Debido a la similitud a la valoración de las alternativas, se evalúa cómo afectan los criterios la decisión. Primeramente, se consideran los criterios individualmente, para evaluar las diferentes alternativas. En la tabla 12 se puede observar la preferencia de cierta alternativa teniendo en cuenta la ponderación de cada criterio.

Tabla 12. Selección de alternativa óptima de acuerdo a cada criterio.

Factores	Criterio analizado	Alternativa óptima
Impacto en la producción	Factor de recobro	CO ₂ + NC S20 NC
	VPN	Flue-Gas + NC S20 NC
	TIR	Flue-Gas + NC S20 NC
Complejidad de implementación	Madurez de la tecnología	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO
	Complejidad manejo químicos en superficie	CO ₂ + NP de sílice con fluorosurfactante
Impactos ambientales	Restricciones ambientales adicionales	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO
	Impactos sobre el suelo	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO
	Contribución a la disminución de emisiones de CO ₂	CO ₂ + NP de sílice con fluorosurfactante
	Impactos sociales	Generación de empleos directos en la comunidad
	Generación de conflictos legislativos	Gas de reciclo +DANY

5- Resultados

De la Tabla 12 se puede observar que, si se toma cada criterio por separado como 100% responsable de la decisión, se tienen diferentes alternativas óptimas, por ende, para tener una decisión que cubra integralmente los factores influyentes sobre el proyecto, es necesario distribuir este porcentaje entre diferentes criterios.

Como segunda instancia, para analizar la consistencia de la decisión respecto a las demás alternativas, se consideran los cambios de las ponderaciones tanto de los criterios globales como de los locales. Primero se parte del caso base del análisis, que hace referencia a la ponderación realizada por los expertos y los resultados obtenidos a partir de esta, luego se van variando estos datos de manera aleatoria para determinar la sensibilidad de la decisión. Esto se realiza principalmente para evaluar el cambio de los resultados si hay un cambio de decisores.

En la Tabla 13 se presenta la jerarquización de alternativas donde el caso 1 es el caso base; es decir, el que usó las ponderaciones dadas por los expertos, en los casos 2-5, se fijan los pesos locales y se varían los pesos globales, anulando el aporte de un criterio y en los casos 6-10, se fijan los pesos globales y se varía de a dos pesos globales por caso (en el Anexo H se encuentran los datos utilizados para el análisis de sensibilidad).

Tabla 13 Ranking de alternativas

	Gas de reciclado + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Gas de reciclado + EC600 2A-NALCO	CO ₂ + EC600 2A-NALCO	Flue-Gas + EC600 2A-NALCO	Gas de reciclado + Nanocápsulas S20 NC	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC
Caso 1	9	6	8	2	1	3	7	4	5
Caso 2	9	6	8	4	1	2	7	3	5
Caso 3	9	6	8	2	1	4	5	3	7
Caso 4	9	6	8	1	3	2	4	6	5
Caso 5	9	6	7	5	1	2	8	3	4
Caso 6	9	6	8	4	1	3	7	2	5
Caso 7	9	6	5	7	3	2	8	4	1
Caso 8	9	7	6	1	3	2	8	5	4

Caso 9	9	8	7	1	3	2	5	6	4
Caso 10	9	6	5	7	3	2	8	4	1
Caso 11	9	6	8	2	1	4	5	3	7
Caso 12	9	7	8	1	3	2	5	6	4
Caso 13	9	5	6	7	1	2	8	4	3
Caso 14	9	5	8	4	1	3	7	2	6
Caso 15	9	7	8	1	3	2	4	5	6
Caso 16	9	8	7	1	3	2	5	6	4
Caso 17	9	7	8	1	3	2	4	6	5
Caso 18	9	6	8	1	2	3	7	4	5

Como se puede observar en la Figura 24, del análisis de sensibilidad realizado sobre las ponderaciones de los expertos (caso base-1), con el objetivo de establecer la consistencia de la alternativa ganadora frente a cambios en los pesos globales y locales de los criterios, se puede concluir que teniendo en cuenta las posiciones obtenida en cada uno de los casos, en promedio, la alternativa óptima es CO₂ + EC6002A-NALCO y la peor Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante.

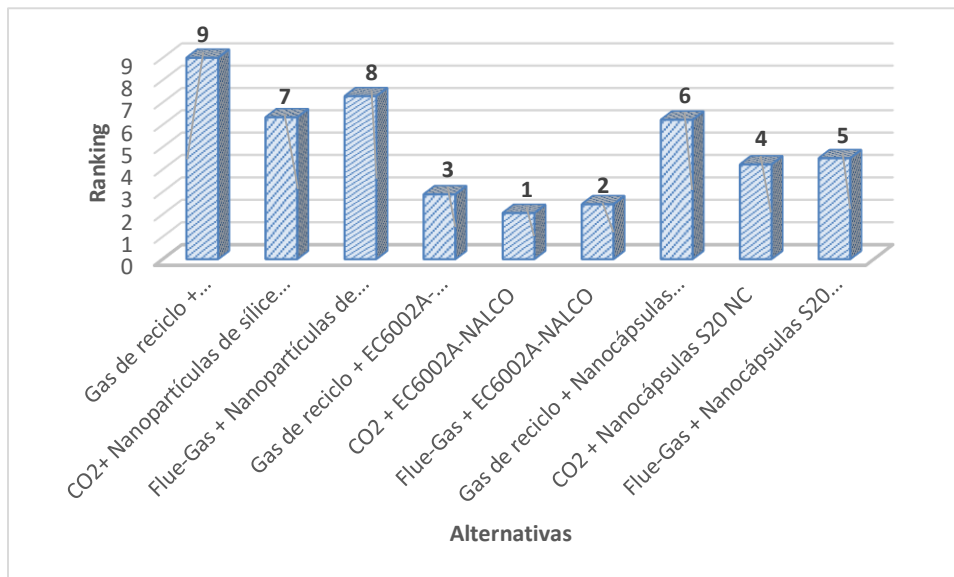


Figura 24 Ranking de alternativas de acuerdo al análisis de sensibilidad, donde 1 es la mejor alternativa o alternativa óptima seleccionada y 9 es la alternativa que ocupa el último lugar en la jerarquía.

5- Resultados

Considerando lo anterior, los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad son parecidos a los obtenidos por medio de la metodología. Lo cual indica que el método tiene una alta tolerancia en los parámetros de entrada del caso base gracias a la difusividad del método, por ende, pequeñas variaciones no tienen un gran impacto en el resultado final porque se encuentran en el rango de tolerancia del FAHP.

Por otro lado, cuando se tiene en cuenta cada criterio de manera individual, CO₂ + EC6002A-NALCO no es la alternativa óptima. Sin embargo, cuando se tienen en cuenta diferentes factores que afectan el proyecto, es la opción óptima, de aquí la importancia de tener en cuenta diferentes criterios a la hora de seleccionar la mejor alternativa para la inyección de químicos en un campo petrolero.

Cabe aclarar que los criterios propuestos en este trabajo de investigación no son los únicos que se pueden tener en cuenta a la hora de realizar un análisis de decisión en un proyecto de recobro mejorado químico, estos factores pueden variar de acuerdo a la zona y amplitud del proyecto.

5.3 Comparación de resultados entre modelos AHP, FAHP, TOPSIS, AHP+TOPSIS y FAHP+TOPSIS sobre el conjunto de alternativas.

Con el fin de ilustrar la aplicabilidad del método propuesto, se realiza una comparación de resultados con los métodos clásicos, a partir de los datos publicados en el Anexo G- Tablas 20-25 para AHP, Anexo G- Tablas 30-31 para FAHP, Anexo G- Tabla 26-27 para TOPSIS+AHP, Anexo G- Tabla 28-29 para TOPSIS.

Como se puede observar en la Tabla 14, se presentan cambios en la ordenación de las alternativas dependiendo del método utilizado. Sin embargo, los métodos que utilizan el proceso analítico jerárquico tienen varias similitudes. Por ejemplo, seleccionan el mismo fluido como mejor alternativa. Fuzzy AHP y AHP seleccionan la misma alternativa como la óptima; a pesar de ello, éstos métodos por sí solo utilizan solo valores abstractos para la jerarquización de las alternativas; es decir, solo tienen en cuenta la preferencia de los expertos sobre los criterios y no los valores cualitativos o cuantitativos de estos factores.

Por otro lado, FAHP+TOPSIS y AHP+TOPSIS, seleccionan igualmente a la más óptima, en esta jerarquización también tuvo mucha influencia la alta ponderación que obtuvo el factor de recobro y los valores de este criterio cuando se utiliza CO₂ (Ver Anexo G). No obstante, estas dos últimas metodologías, FAHP+TOPSIS y AHP+TOPSIS, seleccionan de manera diferente a la segunda mejor opción, donde de acuerdo a la experiencia, disponibilidad del fluido y reconocimiento industrial del químico en un campo petrolero, el método que más se aproxima a la realidad es el FAHP+TOPSIS.

Tabla 14. Comparación de métodos multicriterio

Ranking	Fuzzy-AHP+TOPSIS	Fuzzy-AHP	AHP	TOPSIS	AHP+TOPSIS
1	CO ₂ + EC6002A-NALCO	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	CO ₂ + EC6002A-NALCO
2	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	CO ₂ + EC6002A-NALCO	CO ₂ + EC6002A-NALCO	Flue-Gas + EC6002A-NALCO
3	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO
4	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC
5	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC
6	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante
7	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	CO ₂ + DANY	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC
8	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Flue-Gas + DANY	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante
9	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Gas de reciclo + DANY	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante

5- Resultados

A partir de los resultados obtenidos, se puede decir que el modelo aborda las características relevantes del problema estudiado, tratando la incertidumbre y la consecuencia de ésta correctamente. Además, el modelo cuantifica elementos cualitativos que son estratégicos en el problema de decisión.

6. Conclusiones

En este documento, se discute un marco para la toma de decisiones en la industria de E&P que combina una base teórica con experiencia práctica, donde los criterios establecidos para la evaluación de las alternativas se relacionan directamente con los objetivos de la decisión. Durante el proceso de selección participaron tres decisores con experiencia en el sector hidrocarburos, que a través de la metodología integraron sus preferencias.

La metodología de selección para tratamientos químicos EOR propuesta, recopila y ajusta datos de campo y opiniones de expertos, capturando a su vez la incertidumbre asociada a estos juicios. La metodología no solo tiene en cuenta un análisis cualitativo y cuantitativo, sino que también considera una combinación dinámica entre diferentes áreas que componen un proyecto de recobro mejorado, combinando la influencia de factores financieros, ambientales, sociales y técnicos, con el fin de dar la mejor respuesta al mercado petrolero y al rendimiento dinámico de los yacimientos de manera racional.

Cada campo petrolero tiene varios puntos específicos en los que se puede enfatizar para el proceso de toma de decisiones para la selección de tratamientos químicos EOR, en este caso tomamos los que son importantes para un campo petrolero colombiano específico. Teniendo en cuenta esto, el proceso de FAHP determinó la importancia relativa de cada componente global, siendo la complejidad de implementación de la tecnología el factor más importante. Sin embargo, el resultado final muestra que tanto el criterio complejidad de manejo de químicos en superficie, perteneciente al criterio global complejidad de implementación como el criterio restricciones ambientales adicionales, perteneciente a los criterios ambientales, obtuvieron la mayor importancia entre todos los sub-criterios, demostrando que la seguridad ambiental y de los operadores priman en cualquier proyecto de recobro mejorado, así como la cantidad de petróleo potencialmente recuperable, siendo evidencia el factor de recobro como tercer criterio más importante, perteneciente al factor global impacto en la producción.

La alternativa denominada como “óptima” o “la mejor” entre los criterios considerados en este trabajo, se define como aquella que propende por alcanzar el objetivo de maximizar positivamente el impacto en la producción de petróleos, minimizar el impacto

6- Conclusiones

ambiental, maximizar positivamente el impacto social y minimizar las complicaciones que se puedan presentar con los diferentes materiales y equipos a la hora de realizar una inyección químico-fluido en un proceso de recobro mejorado.

Finalmente, el flujo de trabajo selecciona la inyección de CO₂ + EC6002A-NALCO como la mejor opción, lo que se justifica por el buen rendimiento e impacto que tiene a nivel ambiental y de recuperación de crudo el CO₂ en los yacimientos de petróleo. Además, la madurez tecnológica del químico EC6002A-NALCO (DANY) genera confianza de aplicación entre la comunidad petrolera, ya que sus beneficios y desventajas son ampliamente conocidos.

La alternativa con la calificación más baja fue Gas de recicló + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante, esto porque el gas de recicló, a pesar de ser un fluido altamente disponible en campo, no tiene las capacidades de movilización de crudo como el CO₂ y las nanopartículas como químico son una tecnología emergente, lo cual genera cierto recelo a la hora de implementarse en un campo petrolero, debido a que la incertidumbre asociada es alta, a pesar de haberse demostrado su buen rendimiento a nivel laboratorio. Además, las regulaciones legales y ambientales para este tipo de químico todavía no son claras en Colombia.

Otras metodologías multicriterio pueden ser aplicadas a este tipo de problemas como se mostró en la Tabla 11; sin embargo, dado que las preferencias de los tomadores de decisiones se realizan mediante variables lingüísticas y que dependen de criterios tangibles e intangibles, deben estar representadas por la teoría de conjuntos difusos (FAHP). Por otro lado, el tiempo empleado para determinar la solución ideal al problema es mucho menor mediante la utilización de TOPSIS, que realizando solamente y en su totalidad una metodología como AHP.

Por otro lado, el algoritmo genético planteado ofrece una solución efectiva a la inconsistencia en las matrices de decisión, minimizando el tiempo empleado en la ponderación de criterios y facilitando el proceso de decisión. El algoritmo está calibrado para ofrecer solo una solución para cada problema, dependiendo del tamaño de la matriz de comparaciones pareadas difusa. Además, gracias a la ecuación planteada en esta tesis,

el algoritmo mantiene la mayor similitud posible con la matriz original, corrigiendo solamente los puntos que generan inconsistencia.

Finalmente, queremos aclarar que los resultados pueden cambiar dependiendo de las características de cada campo petrolero y confiando en los diferentes factores que se tienen en cuenta en un proyecto EOR. Entonces, el modelo está abierto a modificaciones de criterios y alternativas para una mejor representación de escenarios reales.

6.1 Trabajo futuro

Tras el presente estudio, observamos que una línea de investigación futura que quedaría abierta sería analizar el grado de optimismo de los diferentes expertos, y cómo podría influenciar esto en el resultado final de la ponderación, esto podría realizarse con métodos parecidos o iguales a el *Attributional Style Questionnaire (ASQ)* o *Workplace Explanations Survey (WES)*.

Otra línea que queda abierta es la utilización del proceso analítico en red difuso (FANP por sus siglas en inglés) solo en los criterios que tengan influencia mutua sobre ellos y FAHP sobre los demás. Por ejemplo, supongamos que tenemos una alternativa que tiene riesgo de producir altos niveles de SO_x , H_2S o de compuestos metálicos, esto podría representar costos adicionales en material y equipo, además de un problema comercial, ya que el producto generalmente tendrá que venderse más barato, debido a que requerirá procesos adicionales de refinación. Entonces este criterio tendría una influencia e interdependencia con la parte económica y técnica del proyecto.

Otra línea de investigación que se podría seguir a partir de este trabajo es el uso integrado de procesos de aprendizaje de máquinas (ML, por sus siglas en inglés) con procesos multicriterio para la selección de otros procesos en la Industria de Petróleo y Gas o cualquier otra. Estos algoritmos podrían ser métodos de clasificación como máquinas de soporte vectorial, árboles de decisiones, XBoost, etc. Esto podría ayudar a que las ponderaciones y selecciones dadas a partir de ellas, puedan ser guardadas en un historial y ser reutilizadas para el entrenamiento de métodos supervisados, con el fin de automatizar procesos en la industria.

A. Anexo: Métodos de recobro mejorado

- **Métodos térmicos:** consisten en la transferencia de energía en forma de calor de la superficie hacia el yacimiento donde se vaporiza la forma líquida y se reducen las viscosidades del crudo, ayudando así a la movilidad del crudo [43] [44].
 - **Inyección de agua caliente:** consiste en inyectar agua caliente y agua fría, lo cual hace que se desplace el petróleo inmiscible. Estos procesos de recuperación se aplican a crudos pesados [43] [44]. El agua también se puede inyectar alternada con gas (WAG), lo cual aumenta la movilidad y desplazamiento de los fluidos evitando la canalización [5].
 - **Inyección continua de vapor:** consiste en inyectar al yacimiento corrientes continuas de vapor, formando así una nube que empuja lentamente el crudo hacia las zonas productoras. Este método se aplica a crudos pesado [43] [44].
 - **Inyección cíclica o alternada de vapor (CCS):** se realiza en un pozo que opera como inyector y productor al mismo tiempo, el vapor es inyectado continuamente por un periodo de tiempo. Luego el pozo es cerrado por unos días y se deja en fase de remojo dejando que el calor inyectado se transfiera y se distribuya uniformemente. En la etapa final el pozo se abre para reiniciar la producción [43] [44].
 - **Inyección de vapor asistida por gravedad (SAGD):** esta técnica requiere grandes cantidades de energía y emite cantidades importantes de gases de efecto invernadero hacia el ambiente. Consiste en emplear dos pozos

horizontales, uno por encima del otro. El pozo de la parte superior se utiliza como generador de vapor, mientras que el de abajo extrae el crudo. Se forma una cámara de vapor hacia la cima por diferencia gravitacional lo que aumenta la producción [43] [44]. Los siguientes métodos se consideran variaciones del SAGD:

- ✓ **VAPEX (Vapour Extraction):** consiste en la inyección de un disolvente (metano, propano) que reduce la viscosidad del crudo mediante la difusión impulsada por la transferencia de masa entre el disolvente y el crudo pesado. En este método se perforan dos pozos horizontales paralelo (como en SAGD) con el fin de maximizar el área disponible al flujo y así, incrementar la afluencia de la formación al pozo. El disolvente se inyecta en el pozo superior (inyector), mientras que el aceite diluido generado por la difusión de disolvente aceite desciende por gravedad al pozo inferior (productor) [44][45].
- ✓ **Combustión en sitio (in Situ) (ISC):** en este método se inyecta aire a una sección calentada del depósito. Al llegar a un umbral de temperatura, el oxígeno en el aire inyectado reacciona con el aceite en el lugar y genera calor, una fracción de aceite ligero, así como de vapor y otros productos de reacción gaseosos, principalmente CO₂, que ayudan a impulsar el aceite mejorado (fracción más ligera) hacia los pozos de producción. Aunque el proceso ISC puede ser altamente eficiente, produce cantidades significativas de CO₂, un potente gas de efecto invernadero [43] [44].
- **Inyección de gases:** estos métodos buscan que la tensión interfacial entre el fluido inyectado y el crudo se reduzca [43] [44].
 - **Inyección de CO₂:** en este método el gas inyectado se solubiliza en el crudo remanente a medida que las fracciones ligeras que lo comprenden se disuelven en el gas. Lo anterior ocurre cuando la densidad del CO₂ es alta y el crudo contiene cantidades significativas de fracciones ligeras. Cuando

se da un proceso miscible, el gas puede desplazar al crudo de los poros empujándolo hacia el pozo productor. Cuando el proceso es inmisible, la solución de CO₂ reduce la viscosidad del aceite e incrementa el factor volumétrico. La inyección de este gas promueve la eliminación de las fracciones finas de un crudo pesado, previene y limpia los bloqueos por emulsiones y aumenta la permeabilidad de las formaciones carbonatadas [43] [44]. Esta técnica promueve la captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC), tecnología que se utiliza para reducir las emisiones de CO₂ provenientes de grandes centrales eléctricas o plantas industriales [46].

- **Inyección de N₂:** este método se limita para los yacimientos profundos que tengan presiones altas. La inyección de nitrógeno promueve el movimiento de las fases gaseosas y líquidas en un yacimiento, es un proceso inmisible en el cual se incrementa la recuperación por hinchazón de petróleo, reducción de la viscosidad y vaporización limitada del petróleo crudo [43] [44].
- **Inyección de hidrocarburos:** en esencia es gas natural inyectado enriquecido principalmente de una mezcla de etano, propano, butano para aumentar la solubilidad con el crudo del yacimiento. Cuando el proceso es miscible se pueden usar tres técnicas: inyectar gas de petróleo licuado (GLP), gas natural rico en etano hasta hexano seguido de gas y agua o inyectar gas de reciclaje a alta presión [43] [44].
- **Métodos químicos:** en este tipo de métodos se inyectan sustancias químicas especiales (surfactantes, polímeros, etc.) con el propósito de disminuir la tensión superficial, la relación de movilidad y la canalización [43] [47].
 - **Inyección de polímeros:** en este método se modifica el agua con el fin de aumentarle la viscosidad, de manera que la relación de fuerzas viscosas disminuya. Este método aplica principalmente en formaciones arenosas con crudo ligero a intermedio. El aumento de la temperatura del yacimiento interviene en la estabilidad de los polímeros inyectados. El polímero debe

ser inyectado a una temperatura menor de 175°F [43], [44], [47]. Un ejemplo de algunos polímeros son: poliacrilamidas, polisacáridos (Goma Xantano) y polióxidos de etileno [48].

- **Inyección de surfactantes:** disminuye la tensión interfacial (IFT) entre el agua y el crudo hasta que moviliza el crudo, entiéndase por tensión interfacial *la energía de Gibbs por unidad de área de interfaz a temperatura y presión fijas* [49]. La temperatura del yacimiento debe ser menor a 93°C y la salinidad debe ser estrictamente controlada [43], [44], [47]. Algunos ejemplos de surfactantes son: estereato de sodio y 4-5-dodecil-Bencensulfonato [50].
- **Inyección de álcalis:** este método se utiliza cuando el crudo es ácido. Mediante este método se busca reducir la tensión entre el crudo y el agua, lo que luego genera una emulsión agua/aceite cuya viscosidad es menor a la del aceite de origen mejorando significativamente el flujo del crudo hacia superficie [43], [44], [47]. Algunos álcalis son: hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na₂CO₃) y carbonato ácido de sodio (NaHCO₃) [50].
- **Métodos microbiológicos (MEOR):** se basan en la inyección de bacterias secretan biopolímeros o biosurfactantes seleccionados. Estos microorganismos podrían desempeñarse como vehículo transportador de petróleo residual o agentes tapón para aislar selectivamente del yacimiento zonas no deseadas [44].

B. Anexo: Etapas de un proyecto EOR

Diseño de EOR

En esta etapa se da el planteamiento del proyecto, donde se plantea si será de un solo pozo o varios pozos, esto se realiza teniendo en cuenta el presupuesto disponible, y de acuerdo con esto, se plantean ideas para el control técnico y económico [51].

En esta parte del proyecto como primera instancia se realiza un reconocimiento de los recursos disponibles, la localización del campo en estudio, la experiencia disponible y la complejidad del yacimiento. Luego se priorizan las técnicas que se podrían utilizar para realizar el recobro mejorado del campo en estudio en función de los parámetros de yacimiento como temperatura, permeabilidad, presión, etc., esta técnica es llamada “*screening*” técnico [52].

Screening

En el “*screening*” técnico se comparan las características del yacimiento en estudio (roca y fluidos) con otros similares y se determinan los mejores procesos de recobro mejorado para el comportamiento de ese yacimiento [52].

Lo primero a realizar en este estudio es recolectar los datos necesarios sobre el yacimiento, como son gravedad API, profundidad, porosidad, etc., con esta información y ciertos criterios de evaluación, se comparan para varias técnicas de recobro mejorado y basados en los éxitos y fracasos previos de dichos procesos en campos o yacimientos

similares, los ingenieros pueden descartar y seleccionar los métodos de recuperación terciaria adecuados para su caso [52].

Una vez se tiene seleccionado el método se pasa a la siguiente etapa donde se corrobora en el laboratorio que las propiedades físicas de los fluidos puedan ser afectadas como se espera por las técnicas preseleccionadas [5].

La evaluación económica se realiza una vez se escogen las técnicas EOR que pueden ser aplicadas en el campo, con el fin de disminuir el rango de alternativas. La evaluación económica puede estar ligada a la simulación y análisis de riesgos, donde los criterios a evaluar son los expuestos por los inversionistas o expertos interesados en el proyecto. Este análisis financiero también se podría realizar en una etapa posterior donde se actualizan los costos e ingresos para reevaluar el impacto de las tecnologías EOR seleccionadas para el proyecto [52].

Evaluación EOR

En esta etapa se realiza una simulación del proceso a nivel computacional y de laboratorio, donde se caracteriza el yacimiento y se evalúan sus propiedades, con el fin de predecir cuánto petróleo se podrá recuperar.

Las técnicas de recobro mejorado involucran componentes físicos complejos, por ende, el yacimiento en estudio debe ser caracterizado desde la escala de poro hasta escala yacimiento. Como se muestra en la Figura 25, el estudio se realiza por etapas con el fin de reducir la incertidumbre asociada a la aplicación de la tecnología seleccionada, para así alcanzar los objetivos técnicos y económicos esperados [5].

Las interacciones en el sistema roca-fluido a escala de poro interfieren de gran manera en las dinámicas de flujo y transporte en escala yacimiento [5]. La configuración morfológica del sistema poroso, así como las interacciones superficiales e interfaciales afectan la eficiencia de desplazamiento. Para evaluar esto, se utilizan pruebas dinámicas a nivel de laboratorio en micromodelos y en núcleos [5].

B- Anexo: Etapas de un proyecto EOR

Por otra parte, considerando que las técnicas de EOR involucran una fenomenología compleja y las heterogeneidades del medio poroso real, se requieren de datos a escala de campo que permitan alimentar los datos de modelo dinámicos, así como para ajustar sus parámetros correspondientes [5].

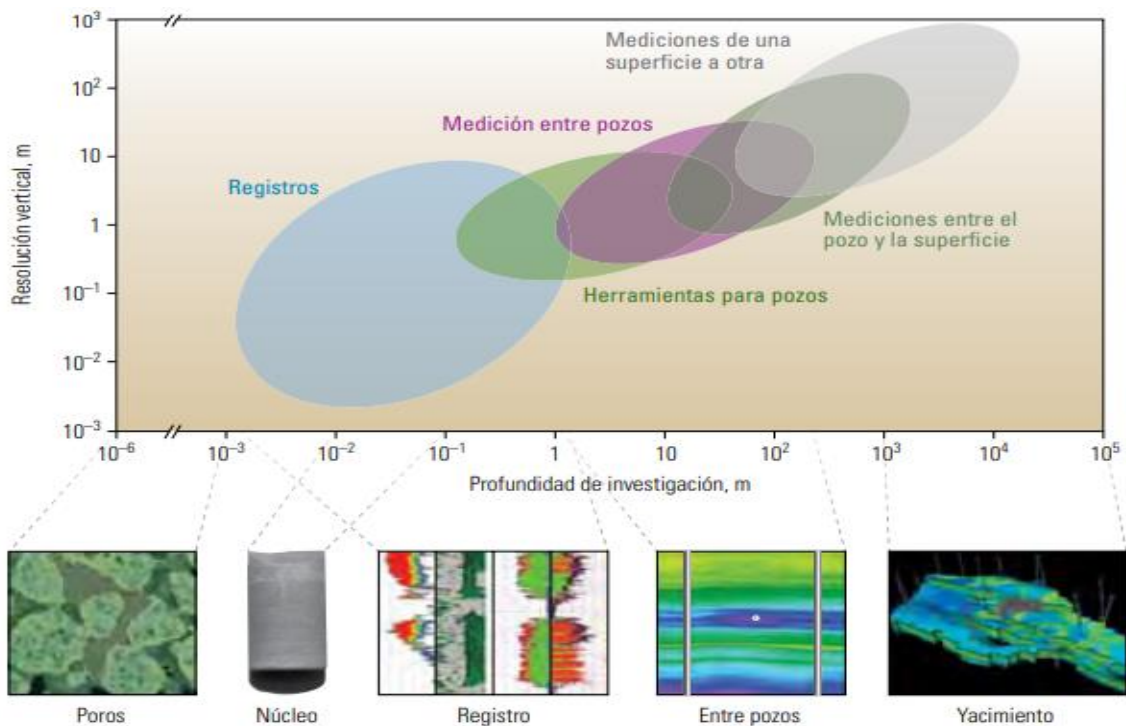


Figura 25 Fuente: Modificado de Al-Mjeni et al., 2011. Escalas de evaluación para procesos de recobro mejorado. Esta gráfica incluye herramientas y mediciones para los proyectos de recobro terciario en campo (extremo superior) y laboratorio (extremo inferior). Incluye mediciones que abarcan desde la escala de poro hasta la escala de yacimientos.

La simulación en el laboratorio indicará el ajuste de la formulación química a utilizar teniendo en cuenta los requerimientos del proceso de inyección seleccionado. Esta evaluación experimental se realiza en una especie de tubo de acero inoxidable de determinada longitud que se empaqueta con una muestra de roca representativa del yacimiento. Esta muestra se satura con petróleo proveniente de la misma formación y se pone a condiciones de temperatura y presión similares a las del yacimiento. Esta simulación se realiza a seis presiones de inyección diferentes, luego de cada corrida se determina la cantidad de gas o líquido remanente, su densidad y peso [5]. Una vez aprobada esta etapa, se avanza a la implementación del piloto.

Implementación y monitoreo EOR

Una vez que un método EOR ha sido evaluado a través de pruebas de laboratorio y se ha demostrado que satisface los criterios en estudio, se empieza la etapa de evaluación en el campo a través de una prueba piloto. Aquí se establecen los fluidos a inyectar y sus tasas de inyección [5].

Las pruebas pilotos de campo se plantean para evaluar el método de recuperación terciaria escogido en campo, entre los objetivos específicos de estos proyectos según Al-Mjeni et al.,2011 se tiene:

- Evaluación de la eficiencia de la recuperación.
- Evaluación de los efectos de la geología del yacimiento sobre el desempeño.
- Reducción del riesgo técnico y económico en los pronósticos de producción.
- Obtención de datos para calibrar los modelos de simulación de yacimientos.
- Identificación de problemas e inquietudes operacionales.
- Evaluación del efecto de las opciones de desarrollo sobre la recuperación.
- Evaluación del impacto ambiental.
- Evaluación de la estrategia operativa para mejorar los aspectos económicos y la recuperación

El monitoreo de la técnica implementada en campo genera información de cómo el yacimiento responde ante el recobro mejorado, dando la oportunidad de controlar oportunamente parámetros de producción como tasa de inyección, presiones, temperaturas, entre otros [53].

Los registros de pozo, sísmica y sensores ubicados en el pozo son los principales asistentes para monitorear el éxito de las operaciones de recuperación terciaria en el campo y para ajustar los parámetros operacionales necesarios con el fin de garantizar el logro de las metas propuestas [54].

C. Anexo: Base matemática del AHP

Los instrumentos que se utilizan en el método que son principalmente matrices, las cuales tienen que cumplir una serie de características como son [55]:

- Reciprocidad:

$$\text{Si } a_{ij} = x, \text{ entonces } a_{ji} = 1/x, \text{ con } 1/9 \leq x \leq 9 \quad (\text{C-1})$$

- Homogeneidad:

Si los elementos i y j son considerados igualmente importantes, entonces:

$$a_{ij} = a_{ji} = 1; \text{ además, } a_{ii} = 1 \text{ para todo } i \quad (\text{C-2})$$

- Consistencia:

$$\text{Se satisface que } a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik} \text{ para todo } 1 \leq i, j, k \leq n \quad (\text{C-3})$$

Matriz de comparaciones pareadas

Según las publicaciones de Thomas Saaty (2001) y Toskano Hurtado (2002) [23], [27]:

Siempre que se toma una decisión se hace en función de una serie de criterios, y una vez estos han sido definidos, se debe examinar si son de igual importancia o no. Entonces se forma una matriz $n \times n$ que contiene comparaciones en función de la importancia de cada criterio teniendo en cuenta la escala de Saaty mostrada en la Tabla 6.

Sea W una matriz $n \times n$ de comparaciones pareadas de n criterios, donde n es un número entero. Sea W_{ij} el elemento (i, j) de W , para $i = 1, 2, \dots, n$, y, $j = 1, 2, \dots, n$; W_{ij} es

la ponderación del criterio en el renglón i comparado con el criterio de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de W_{ij} será igual a 1, debido a que se está comparando el criterio consigo mismo. Además $W_{ij} \cdot W_{ji} = 1$.

Si la actividad i tiene un número asignado diferente de cero, cuando se compara con alguna actividad j , entonces j tiene el valor recíproco cuando se compara con i . Lo que indica que si la diagonal de la matriz es 1 y la mitad de la diagonal hacia abajo es el recíproco $1/W_{ji}$, se deben hacer tantas comparaciones como el rango de la matriz por el rango menos uno sobre dos:

$$n^{\circ} \text{ comparaciones} = \frac{\text{rang}(W) * [\text{rang}(W) - 1]}{2} \quad (\text{C-4})$$

Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, o jerarquía.

$$W = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C-5})$$

También,

$$W = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/w_{1n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C-6})$$

Procedimiento para sintetizar y hallar las prioridades

Según las publicaciones de Thomas Saaty (2001) y Toskano Hurtado (2002) [23], [27]:

Cuando trabajamos con el AHP y planteamos la matriz de comparación pareada, decimos que hay que calcular su vector propio, que dirá la ponderación de las variables o de los criterios con los cuales se está trabajando. Para esto, se debe corroborar primeramente que la matriz de comparaciones sea consistente, mediante los siguientes pasos:

$$\text{Se satisface que } a_{jk} * a_{kj} = a_{ij} \text{ para todo } 1 \leq i, j, k \leq n \quad (\text{C-7})$$

Se normaliza la matriz dividiendo cada elemento de la matriz por la sumatoria de su respectiva columna cada columna (Ver Anexo E, para una revisión bibliográfica más profunda sobre normalización):

$$M = \begin{bmatrix} \frac{w_{11}}{\sum_{i=1}^n w_{i1}} & \cdots & \frac{w_{1n}}{\sum_{i=1}^n w_{in}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_{n1}}{\sum_{i=1}^n w_{i1}} & \cdots & \frac{w_{nn}}{\sum_{i=1}^n w_{in}} \end{bmatrix} \quad (C-8)$$

Luego se suman los elementos por filas de la matriz normalizada:

$$S = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n M_{1j} \\ \sum_{j=1}^n M_{2j} \\ \sum_{j=1}^n M_{nj} \end{bmatrix} \quad (C-9)$$

Y se calcula el promedio de cada elemento de esa sumatoria:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_{2j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_{nj} \end{bmatrix} \quad (C-10)$$

Luego se multiplica el vector promedio P por la matriz original W , dando como resultado el vector fila total, al cual llamaremos VF :

$$VF = P \cdot W \quad (C-11)$$

Una vez hallado VF , procedemos a dividir elemento a elemento el vector fila total (VF) con el vector promedio P :

$$C = \begin{bmatrix} \frac{VF_1}{P_1} \\ \frac{VF_2}{P_2} \\ \frac{VF_n}{P_n} \end{bmatrix} \quad (C-12)$$

Una vez se obtienen esos cocientes, se determina el índice de consistencia (IC) que nos indica la varianza del error incurrido al estimar W_{ij} . La medida de la inconsistencia puede ser usada para mejorar los pesos que se les han dado a los criterios bajo el juicio de los expertos:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_j \quad (C-13)$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (C-14)$$

Para calcular la razón de consistencia RC, la cual mide la consistencia de la matriz de comparaciones pareadas, se necesita calcular el índice de consistencia (IC) de ésta matriz, el cual dependerá de un valor propio. Debido a que no es posible que el ser humano sea 100% consistente, entonces siempre existirá un grado de inconsistencia y la matriz de comparación pareada tendrá más de un valor propio. Así, el máximo valor propio; es decir, λ_{max} , permitirá estimar el grado de inconsistencia de esta matriz mediante el cálculo del IC mostrado anteriormente.

Para verificar que el grado de consistencia es admisible, se utiliza como referente un índice de consistencia aleatoria (IA) de la matriz original propuesto por el autor (Saaty) y que se obtuvo por simulación. La teoría nos dice que los valores, mostrados en la Tabla 15, son resultado de un promedio de índices de consistencia aleatorios de matrices recíprocas escogidas aleatoriamente. Así, el valor de IA dependerá del rango de la matriz de comparación pareada.

Tabla 15 Fuente: Thomas Saaty, 2001. Índices de consistencia aleatorios. Esta tabla muestra el número de elementos que se comparan y su respectivo índice de consistencia aleatorio en un proceso jerárquico

N° de Elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio de Consistencia (IA)	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

Teniendo los datos anteriores se procede a calcular la razón de consistencia. Se debe tener en cuenta que si la razón de consistencia es mayor a 0.10, la matriz se considera inconsistente. En tal caso, se recomienda reconsiderar los pesos dados a los criterios; es decir, revisar los juicios ingresados en la matriz de comparaciones

a pares y solucionar la inconsistencia. De lo contrario, si la razón de consistencia es menor a 0.10, la matriz se considera consistente.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (C-15)$$

Una vez calculada la razón de consistencia (RC) y determinado si la matriz evaluada es consistente, se debe determinar el vector propio de la matriz de criterios. El vector propio hallado indica la importancia de cada criterio.

En este punto del proceso, nos encontramos dentro de la estructura de la toma de decisiones donde tenemos ponderados los criterios que nos van a permitir tomar la decisión. Una vez ponderados los criterios empezamos a comparar las alternativas con respecto a cada criterio, mediante los siguientes pasos:

- Se plantea la matriz de comparación pareada de las alternativas en función de cada criterio; es decir, una matriz por criterio.
- Se comprueba si la matriz es consistente con el mismo procedimiento planteado anteriormente.
- Se calculan los vectores propios de cada matriz: Los vectores propios de cada matriz nos dicen cuál es la mejor alternativa si se tuviese que tomar la decisión solo en función del criterio evaluado.

Una vez obtenidos todos los vectores propios de cada matriz, como se quiere tomar una decisión en función del número de criterios que tenemos y de la importancia de los mismos, se debe construir una matriz con la ponderación de las alternativas en función de cada criterio (vectores propios de las alternativas por cada criterio) y se debe multiplicar con la ponderación de los criterios (vector propio de los criterios).

El resultado de esta multiplicación será un vector final que nos indicará el peso de cada alternativa en función del número de criterios que se están evaluando, por lo cual, permite elegir la mejor.

D. Anexo: Lógica difusa

La lógica difusa fue planteada por Zadeh en 1965. Es una generalización de la lógica clásica con fronteras imprecisas. Es una de las herramientas de la inteligencia artificial que utiliza la experiencia del ser humano para generar un razonamiento que permita la toma de decisiones. La lógica difusa, es una forma de lógica multivaluada que puede manejar el razonamiento y representar un sistema de gestión a través de un modelo matemático no lineal y para ello se utilizan variables lingüísticas y la definición de conjuntos [24]; donde la variable lingüística será el concepto o atributo a clasificar de forma difusa y sus características son definidas mediante el lenguaje hablado [56]. El valor lingüístico de este tipo de variables son las diferentes clasificaciones que se le atribuyen, por ejemplo, si la variable es una altura, se le podrían asignar los valores de bajo, mediano y alto [56].

La lógica difusa a diferencia de la lógica clásica, posibilita trabajar con datos que no son exactos o cuando no existe un modelo matemático preciso. Además, se puede utilizar en procesos donde se requieren las opiniones o conocimientos de expertos, las cuales pueden ser ambiguas o imprecisas. La teoría difusa también se utiliza cuando las partes de un proceso o sistema son desconocidos o no se pueden realizar mediciones de forma confiable [25].

Teoría de conjuntos difusos

Un conjunto difuso parte del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros, y se define como el valor lingüístico que una aplicación adjudica a cada elemento teniendo en cuenta el grado con que pertenece al conjunto difuso. Decimos que un conjunto es difuso si toma valores entre 0 y 1, y la transición del valor entre cero y uno es gradual y no

cambia de manera instantánea [56], [25]. Un conjunto difuso puede definirse matemáticamente así:

$$B = \{(x, A_B(x)) | x \in U\} \quad (D-1)$$

Donde B es el conjunto difuso, $A_B(x)$ es la función de pertenencia de x y U es el universo del discurso [25].

Un ejemplo de la aplicación de los conjuntos difusos, se puede observar en la Figura 26, con el ejemplo de la altura, donde altura sería la variable difusa a la que se le podrían asignar los valores de bajo, mediano y alto:

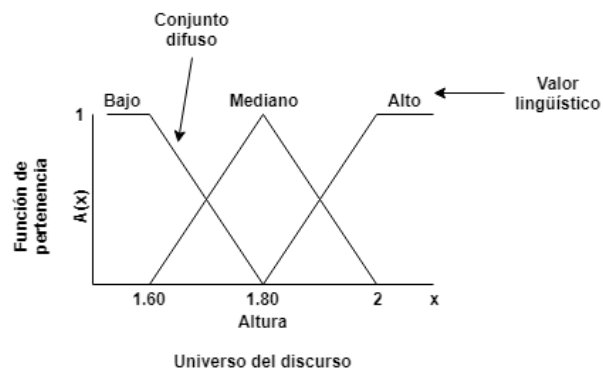


Figura 26. Fuente: Ramírez, O. 2008. Conjunto difuso, ejemplo de altura. [25] En esta figura se puede observar que para que un elemento pertenezca a un conjunto, depende de la relación entre el valor de la variable lingüística (Altura) y el grado de pertenencia al conjunto; es decir, cuánto más cerca esté la pertenencia del conjunto B al valor de 1, mayor será la pertenencia de x al conjunto B.

Funciones de pertenencia

La función de pertenencia de un conjunto indica el grado en que cada elemento del universo dado, pertenece a dicho conjunto. Cualquier tipo de función (dependiendo del tipo de problema) puede ser utilizada para definir un conjunto difuso [25]. Las más utilizadas son la triangular y trapezoidal, las cuales tienen el siguiente comportamiento:

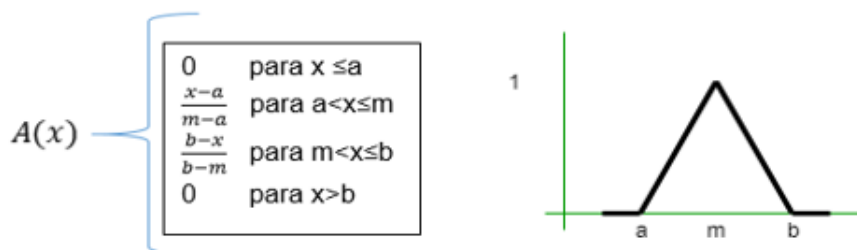


Figura 27 Fuente: Ramírez, O. 2008. Función de pertenencia para un conjunto difuso triangular [25]

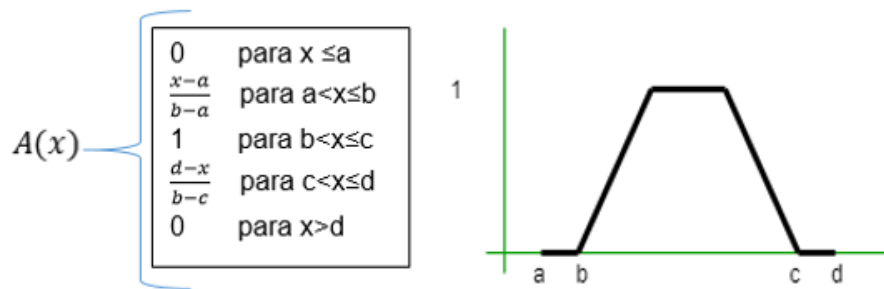


Figura 28 Fuente: Ramírez, O. 2008. Función de pertenencia para un conjunto difuso trapezoidal [25].

Operaciones aritméticas de números difusos

Teniendo en cuenta la operatoria de número triangulares, las cuatro operaciones aritméticas básicas definidas en intervalos cerrados se definen como sigue [57]:

- **Suma:**

$$[a_1, a_3] + [b_1, b_3] = [a_1 + b_1, a_3 + b_3] \text{ para todo conjunto difuso en } \mathbb{R} \quad (\text{D-2})$$

- **Resta:**

$$[a_1, a_3] - [b_1, b_3] = [a_1 - b_1, a_3 - b_3] \text{ para todo conjunto difuso en } \mathbb{R} \quad (\text{D-3})$$

- **Multiplicación:**

Si el conjunto difuso está definido en todo \mathbb{R} :

$$[a_1, a_3] * [b_1, b_3] = [\min(a_1 b_1, a_1 b_3, a_3 b_1, a_3 b_3), \max(a_1 b_1, a_1 b_3, a_3 b_1, a_3 b_3)] \quad (\text{D-4})$$

Si el conjunto difuso está definido solo sobre \mathbb{R}^+ :

$$[a_1, a_3] * [b_1, b_3] = [a_1 b_1, a_3 b_3] \quad (\text{D-5})$$

- **División:**

Si el conjunto difuso está definido en todo \mathbb{R} :

$$\frac{[a_1, a_3]}{[b_1, b_3]} = [\min(a_1/b_1, a_1/b_3, a_3/b_1, a_3/b_3), \max(a_1/b_1, a_1/b_3, a_3/b_1, a_3/b_3)] \quad (\text{D-6})$$

Si el conjunto difuso está definido solo sobre \mathbb{R}^+ :

$$\frac{[a_1, a_3]}{[b_1, b_3]} = [a_1/b_3, a_3/b_1] \quad (\text{D-7})$$

- **Inverso:**

Si el conjunto difuso está definido en todo \mathbb{R} :

$$[a_1, a_3] = [\min(1/a_1, 1/a_3), \max(1/a_1, 1/a_3)] \quad (D-8)$$

Si el conjunto difuso está definido solo sobre \mathbb{R}^+ :

$$[a_1, a_3] = [1/a_3, 1/a_1] \quad (D-9)$$

Defusificación o desdifusión

La defusificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. En este proceso se utilizan métodos matemáticos simples como el método del centroide o centro de gravedad, método del promedio ponderado y método de membresía del medio del máximo [25].

La defusificación es un proceso que asigna un conjunto difuso a un conjunto real. Este proceso ha atraído mucha menos atención que otros procesos involucrados en sistemas y tecnologías difusas, debido a que muchas veces la defusificación del sistema "termina" donde la incertidumbre y la imprecisión terminan. La defusificación es un modelo de síntesis, por lo tanto, es completamente opuesto al concepto principal de la teoría de conjuntos difusos.

La defusificación debe preservar un orden natural en el grupo de conjuntos difusos; es decir, si $F \leq G$ entonces $D(F) \subseteq D(G)$, para los conjuntos difusos F , G y sus promedios $D(F)$ y $D(G)$.

Existen diferentes métodos de defusificación para un punto, entre ellos se encuentran:

- **Métodos de máxima y derivados:**

Son métodos que seleccionan un elemento del núcleo (*core*) de un conjunto difuso como valor de defusificación. La principal ventaja es la simplicidad [58]. Un núcleo de conjunto difuso (designado como núcleo o "core") consiste en elementos de un universo del discurso en el que ese conjunto se define con el mayor grado de pertenencia al conjunto difuso [59].

- **Elección aleatoria de máximos:**

$$Prob(D(A) = x_0) = \frac{1}{|core(A)|} \quad x_0 \in core(A), \quad (D-10)$$

0 de otro modo

Primero de máximos (FOM, por sus siglas en inglés), Último de máximos (LOM, por sus siglas en inglés), Medio de máximos (MOM, por sus siglas en inglés):

$$FOM(A) = \min core(A) \quad (D-11)$$

$$LOM(A) = \max core(A) \quad (D-12)$$

Para MOM:

$$|core(A) < MOM(A)| = |core(A) > MOM(A)| \text{ si } |core(A)| \text{ es impar} \quad (D-13)$$

$$|core(A) < MOM(A)| = |core(A) > MOM(A)| \pm 1 \text{ si } |core(A)| \text{ es par} \quad (D-14)$$

- **Métodos de distribución y derivados:**

Estos métodos convierten la función de pertenencia en una distribución de probabilidad y cálculo del valor esperado. La principal ventaja es la propiedad de la continuidad.

Centro de gravedad:

$$COG(A) = \frac{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} x A(x)}{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} A(x)} \quad (D-15)$$

Media de máxima:

$$MeOM(A) = \frac{\sum_{x \in core(A)} x}{|core(A)|} \quad (D-16)$$

Distribución básica de la defusificación:

$$BADD(A, \gamma) = \frac{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} x A(x)^\gamma}{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} A(x)^\gamma} \quad (D-17)$$

Donde $\gamma \in [0, \infty)$ refleja la confianza del sistema.

- **Métodos de área:**

En estos métodos, el valor de defusificación divide el área bajo la función de membresía en dos (más o menos) partes iguales [58]; es decir, las técnicas de defusificación del

área usan el área bajo la función de membresía para determinar el valor de la defusificación. La técnica de centro de área, COA, minimiza la siguiente expresión [59]:

$$\left| \sum_{x=\inf(X)}^{COA(A)} A(x) - \sum_{x=COA(A)}^{\sup(X)} A(x) \right| \quad (D-18)$$

E. Anexo: Algoritmo genético

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Estos métodos emulan el proceso de evolución natural, donde sobreviven los que se pueden adaptar mejor al medio. Las poblaciones o soluciones de un problema se asemejan a las poblaciones de la evolución, donde una población es un conjunto de soluciones e individuo a cada una de las soluciones. El objetivo consiste en conseguir la mejor solución por comparación con un conjunto de soluciones teniendo en cuenta operadores de cruzamiento, mutación y funciones de ajuste que calculan el ajuste de las soluciones (fitness), se generan soluciones a partir de soluciones obtenidas y se comparan si son mejores que las anteriores [60].

Este tipo de algoritmo se aplica a optimización, siempre que las soluciones estén limitadas a un cierto rango porque su espacio de búsqueda es discreto. Además, la función objetivo que marca el problema de optimización a resolver siempre es maximizada, y tiene que poder ser definida de forma que se nos indique si es buena o no cierta solución, premiando en el primer caso y penalizando en el segundo. También, cada solución va a ser codificada. Los algoritmos genéticos son computacionalmente simples, pueden ser independientes o integrados y son potentes cuando se trata de soluciones óptimas [61].

Se han planteado diferentes trabajos con algoritmos genéticos para mejorar la consistencia de las matrices de comparaciones pareadas en AHP. En el estado del arte se encuentran documentos como:

En 2011 F. Serra, presentó “*A Genetic Algorithm to Obtain Consistency in Analytic Hierarchy Process*” [61] donde propone una forma de resolver la inconsistencia de las matrices de comparaciones pareadas del método AHP a través de algoritmos genéticos.

Su aplicación al caso de matrices AHP permite la detección de matrices inconsistentes, a la vez que ofrece soluciones alternativas para el tomador de decisiones. En este algoritmo usan como ecuación de ajuste $\text{fitness} = 1 - (\text{CR} + \text{NR})$ donde CR es el radio de consistencia de las matrices de comparaciones pareadas y NR es un factor de no reciprocidad de las matrices. En este caso, los resultados obtenidos podrían ser ineficaces ya que la matriz para la población inicial se genera de manera aleatoria por lo cual se pueden perder la esencia de las consideraciones iniciales (comparación inicial de los decisores) [61].

Se han planteado diferentes trabajos con algoritmos genéticos para mejorar la consistencia de las matrices de comparaciones pareadas en AHP. En el estado del arte se encuentran documentos donde se utilizan AG para la estimación y optimización de la consistencia como son: presentó “*A Genetic Algorithm to Obtain Consistency in Analytic Hierarchy Process*” [61], “*Genetic Algorithms Applied to Inconsistent Matrices Correction in the Analytic Hierarchy Process (AHP)*” [62] y otros estudios utilizan AG para determinar los pesos de los criterios como son: “*Deriving crisp and consistent priorities for fuzzy AHP-based multicriteria systems using non-linear constrained optimization*” [63] y “*A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings-Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study*” [64].

Fases de un algoritmo genético

La estructura de un Algoritmo Genético es un proceso iterativo que actúa sobre una población de individuos. Los algoritmos genéticos están comprendidos en 8 fases:

1. Codificar la información del problema.
2. Inicialización: Generar aleatoriamente la población inicial. Cada individuo necesita tener codificada su información en forma de cromosoma. Cada uno de estos cromosomas son posibles soluciones del problema a estudiar [60], [61].
3. Evaluación de la población: también llamado ecuación de fitness. A cada cromosoma se le aplica la función de aptitud (fitness) que ha elegido para su estudio [60], [61].

4. Selección: se escogen los individuos con mayor aptitud (fitness) para generar una nueva población [60], [61].
5. Reproducción: se genera una nueva población usando los cromosomas con mayor puntuación y añadiendo nuevos cromosomas mediante el cruce y la mutación [60], [61].
6. Cruce(crossover): se eligen aleatoriamente los individuos que se van a reproducir y se mezclan características de los padres de forma aleatoria entre los individuos de la población [60], [61].
7. Mutación: contribuye a introducir diversidad en el proceso; es decir, características que no estaban en los padres, utilizando los cromosomas de mayor puntuación e introducir un cambio aleatorio en sus elementos [60], [61].
8. Condiciones de parada: las condiciones para detener el algoritmo pueden variar según su funcionamiento, diseño u objetivo, estas condiciones pueden ser: obtención de la solución óptima, número máximo de generaciones, límite de tiempo de procesamiento y detención cuando no se produce una mejora sustancial después de un número de generaciones determinado [61].

Matrices difusas inconsistentes

La inconsistencia se considera una violación de la proporcionalidad y de la transitividad. Los problemas de consistencia de las matrices difusas se pueden categorizar como un problema de optimización, donde el objetivo es obtener una matriz consistente pero cercana a la original por medio de pequeñas perturbaciones, ya que se debe mantener el orden de importancia de los elementos comparados dado por los expertos, hasta que se logre el grado de inconsistencia permitido en el método presentado por el doctor Thomas Saaty, el cual que debe ser menor a 0.1 [62].

Evitar que una matriz difusa sea inconsistente es una tarea difícil en especial cuando se maneja un gran número de factores, cuando los juicios de los expertos se basan en la experiencia y el conocimiento y cuando las fallas en matrices individuales favorecen la acumulación de errores en la evaluación de la consistencia de la matriz final [61]. Luego, es difícil obtener consistencia en las matrices de comparaciones pareadas y es necesario contar con una metodología capaz de corregir la ponderación de las matrices sin alejarse de la intención inicial del decisor[61].

Otro inconveniente que se ha identificado es que los pesos derivados de un sistema AHP difuso, muchas veces conducen a soluciones menos consistentes que solo AHP. Para solucionar este problema, se propone el uso de algoritmos genéticos para encontrar una solución óptima. Estos modelos de optimización abordan los juicios imprecisos de los tomadores de decisiones mediante la implementación de una solución heurística [63].

Propuesta de algoritmo genético

Inicialización

La solución inicial proviene de la matriz de decisiones que contiene las preferencias de los decisores. En este caso en particular, para las matrices de comparaciones pareadas de los criterios locales, el tamaño de la población fue de 200 y el tamaño de los cromosomas fue de 45, que es el valor de la triangular superior de la matriz. Para las matrices de comparaciones pareadas de los criterios globales para el caso de estudio, el tamaño de la población fue de 50 y el tamaño de los cromosomas fue de 6.

Las generaciones ocurren con matrices compuestas de pequeños disturbios, ya que al igual que en el caso biológico, la evolución se produce solo con la diversidad. Luego, estas nuevas matrices no muy alejadas de la matriz original se les evalúa constantemente su grado de consistencia.

Evaluación

Un aspecto crucial en el comportamiento de los algoritmos genéticos es la determinación de una función adecuada de adaptación o función objetivo, teniendo en cuenta que la función de evaluación le da a cada individuo la medida adecuada para la situación estudiada [60]. En este caso, la evaluación se realiza primeramente sobre la matriz de comparación por pares difusa que los expertos completan con ayuda la escala lingüística y matemática. Esta matriz se caracteriza por ser cuadrada y recíproca; es decir, para una matriz de orden n , el número de comparaciones es:

$$\frac{n(n-1)}{2} \quad (E-1)$$

La función de aptitud definida considera la inconsistencia (CR) de la matriz y la distancia euclidiana de la matriz optimizada a la matriz original, para que la solución óptima del algoritmo genético no vaya a ser muy ideal o lejos de los primeramente planteado por los decisores. A estas medidas se le agrega un ponderador de 0.5 para mantener el equilibrio entre los dos valores, y se les aplica un logaritmo natural para poder comprimir los datos encontrados y que la selección de nuevos individuos sea lo más aleatorio posible; es decir, que los individuos con valores bajos tengan posibilidad de ser seleccionados y o solo lo de valores altos. Así, para un individuo, su aptitud se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Fitness = \log\left(\frac{1}{1 + 10^{-11} + CR + (distancia * 0.5)}\right) \quad (E-2)$$

Selección

En este paso se puntúan todos los elementos de la población y teniendo en cuenta el esquema de los algoritmos genéticos, los individuos con los mejores puntajes se seleccionan de la población para que sean padres, guardándolos para mezclar después su material genético para crear nuevos individuos y llenar la población. Los individuos se ordenan en función de su evaluación o fitness, y la probabilidad que tienen de reproducirse va según su posición; es decir, se seleccionan los individuos que son capaces de reproducirse. Primero se seleccionan los mejores con una tasa de elitismo del 30% y luego cada cromosoma recibe un puntaje de la evaluación o fitness.

$$Núm_{elitismo} = \text{tasa elitismo} * \text{tamaño población} \quad (E-3)$$

Para recuperar la población perdida se utiliza la fórmula:

$$Núm_{elitismo} = \text{núm}_{elitismo} - 2 * \text{núm}_{cruzamiento} + \text{num}_{elitismo} - \text{tamaño población} \quad (E-4)$$

Reproducción

La tasa de la población que se conserva para ser reproducida es un hiperparámetro que puede variar de acuerdo al problema o tamaño de la matriz, lo que quiere decir que el

operador del sistema puede elegir los valores, una vez que el modelo está completamente parametrizado, en este caso se usó un 70%. En este paso se mezcla el material genético para crear nuevos individuos, eligiendo un punto al azar e intercambiando el material genético de los padres a partir de esta posición.

$$\text{núm_cruzamiento} = \text{round}\left(\frac{\text{tamaño pob} - \text{núm_elitismo}}{2}\right)$$

Mutación

El proceso de mutación se utiliza para garantizar la diversidad de la población, en esta etapa se define la frecuencia con la que debería ocurrir la mutación. La tasa de mutación es un hiperparámetro que puede ser manejado por el operador, se recomienda tener en cuenta el grapo de inconsistencia de la matriz original (población inicial) y su tamaño.

En este caso de estudio, la probabilidad de que un individuo sufra una mutación durante la fase de reproducción es de un 50%, Si la probabilidad es verdadera y el tamaño de los cromosomas (matriz triangular superior) es menor que 15, se muta 1 elemento del cromosoma hijo; de lo contrario se mutan $\frac{(\text{tamaño cromosoma})}{10}$ individuos del cromosoma hijo.

En el caso de aplicación, se mutan máximo 5 individuos por iteración para el caso de los criterios locales y 1 individuo por iteración para el caso de los criterios globales. Cada individuo de la población (menos los padres) tienen una probabilidad de mutar, en este punto es importante mirar que el nuevo valor no sea igual al viejo. Las mutaciones son necesarias para poder explorar nuevas soluciones que no pueden obtenerse combinando el material genético de los padres.

Condiciones de parada

La regla de parada del algoritmo utilizada requiere que el algoritmo deje de buscar cuando la razón de consistencia sea menos a 0.1 o cuando se alcance el número 400 iteraciones, cabe aclarar que el número de iteraciones puede variar de acuerdo al problema.

Diagrama de flujo algoritmo genético

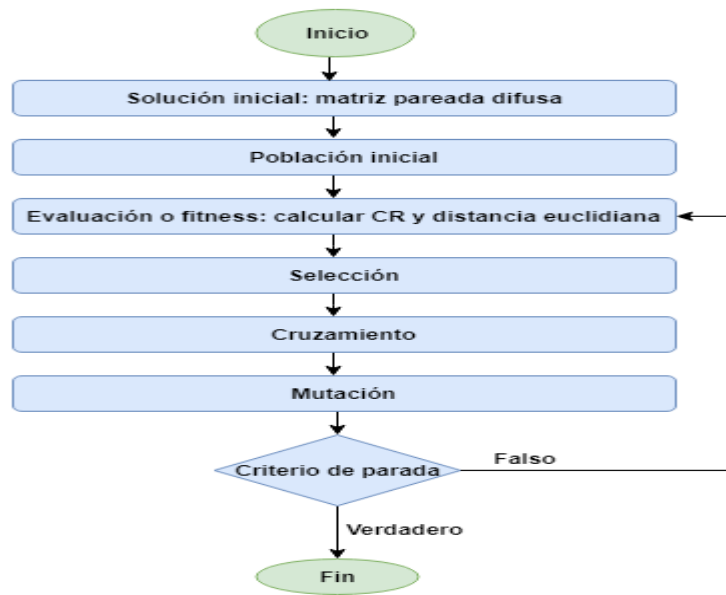


Figura 29. Diagrama de flujo del Algoritmo genético aplicado para optimizar la consistencia de las matrices difusas.

F. Anexo: Normalización

En MCDA la normalización es un proceso de transformación para obtener datos de entrada numéricos y comparables utilizando una escala común. Estudios como los presentados por A. Milani et al. (2004) [65], S. Chakraborty and C.-H. Yeh, (2007) [66], A. Celen (2014)[67], etc., han mostrado los efectos de las técnicas de normalización en la clasificación de alternativas en los problemas de MCDM, señalando que ciertas técnicas son más adecuadas para métodos de decisión específicos que otras. La transformación de criterios se da a través de la estandarización de los datos con el fin de homogeneizar las unidades de los valores de los diferentes criterios o para eliminar su dependencia respecto a las unidades. Incluso aunque los criterios posean las mismas unidades, la normalización se utiliza para minimizar sesgos y evitar favorecer implícitamente alternativas que puedan tener mayores valores [68].

Principales métodos de normalización

El proceso de normalización puede realizarse bajo varias modalidades, por ejemplo: sin cambio de magnitud, como podría ser el caso de mediciones de temperaturas realizadas a diferentes escalas termométricas y luego del proceso de normalización, son presentadas en una común.

Con cambio de magnitud a escala libre, un ejemplo de este caso podría ser si se realiza una transformación de datos de producción de petróleo expresados en barriles por día a una escala de valores de mercado, como son dólares.

Con cambio de magnitud a escala fija, por ejemplo, cuando se transforman datos de consumo de gas en una escala adimensional acotada entre unos valores fijos. Este tipo de

normalización es la que se aplica en la mayoría de los problemas de toma de decisión multicriterio.

En la Tabla 16 se muestran diversos métodos de normalización, y cada uno de ellos es divide en dos fórmulas: beneficio y costo, teniendo en cuenta lo realizado por L. M. Camarinha-Matos, A. J. Falcão, N. Vafaei, y S. Najdi [68], quienes aseguran que la decisión final (ponderación) se ve afectada positivamente si se tienen en cuenta estas fórmulas para los criterios establecidos, ya que cuando es un criterio está asociado a un beneficio con valores altos, corresponderá por ende a valores de normalización altos y cuando es un criterio asociado a un costo con valores altos, corresponderá a valores normalizados bajos; es decir, corresponderá a una maximización de los beneficios y a una minimización de los costos.

Tabla 16. Fuente: Adaptado de Camarinha-Matos et al. 2016 [68] Métodos de normalización más utilizados en métodos MCDA.

Método de normalización	Condición de uso	Fórmula
Lineal: Máxima	Criterios asociados a beneficios	$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{max}}$
	Criterios asociados a costos	$n_{ij} = 1 - \frac{r_{ij}}{r_{max}}$
Lineal: Max-Min	Criterios asociados a beneficios	$n_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{min}}{r_{max} - r_{min}}$
	Criterios asociados a costos	$n_{ij} = \frac{r_{max} - r_{ij}}{r_{max} - r_{min}}$
Lineal: suma	Criterios asociados a beneficios	$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$
	Criterios asociados a costos	$n_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{r_{ij}}}$
Normalización vectorial	Criterios asociados a beneficios	$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}}$

	Criterios asociados a costos	a	$n_{ij} = 1 - \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}}$
Normalización logarítmica	Criterios asociados a beneficios	a	$n_{ij} = \frac{\ln(r_{ij})}{\ln(\prod_{i=1}^m r_{ij})}$
	Criterios asociados a costos	a	$n_{ij} = \frac{1 - \frac{\ln(r_{ij})}{\ln(\prod_{i=1}^m r_{ij})}}{m - 1}$

Chakraborty y Yeh [69] analizaron los efectos de esas normalizaciones para la preferencia de orden por similitud con el método de solución ideal (TOPSIS) calculando la consistencia de clasificación y la sensibilidad de peso de cada normalización y demostraron que la técnica de normalización de vectores es la mejor para implementar en el método TOPSIS. Este resultado fue validado luego por Vafaei et al. [70], quienes utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman para concluir que la mejor técnica de normalización para el método TOPSIS es la normalización vectorial.

Camarinha-Matos et al. [68], estudiaron qué técnica de normalización es más adecuada para usar con el método AHP. Las pruebas demostraron que la técnica de normalización logarítmica no se puede usar en el método AHP porque puede dar como resultado valores cero o infinitos en los datos normalizados, lo que no es aceptable usar en el método. Además, dado que AHP requiere que las columnas de las matrices por pares sumen 1, las técnicas: lineal máximo, lineal mínimo-mínimo y las técnicas de normalización de vectores tuvieron que volver a normalizarse con una suma lineal antes de ser comparadas. Para evaluar la idoneidad de las técnicas de normalización para AHP utilizaron la correlación de Pearson y Spearman y los valores medios de r_s . Los resultados mostraron que la mejor técnica de normalización es lineal: máx. combinada con suma lineal para garantizar que la suma sea 1.

Para Fuzzy AHP la normalización de un conjunto de pesos difusos es importante para reducir la parcialidad, facilitar el proceso de interpretación y para alcanzar una solución única. En la situación difusa, se pueden formular diferentes significados de "normalización difusa"[33]. Por lo tanto, en este trabajo se toma como referencia el estudio realizado por P. Chang y E. Lee (1994) sobre la normalización difusa, donde se llegó a la conclusión de

que los métodos de columnas normalizadas con promedio de filas difusas (FR1VINC) son la mejor opción para normalizar los pesos provenientes de una matriz difusa. Esta clasificación corresponde a dos métodos en particular: método de columnas normalizadas con promedio de filas difusas con normalización y división difusa (FR1VINC +FNFD) y método de columnas normalizadas con promedio de filas difusas con normalización difusa geométrica (FR1VINC +GFN)[33]. Teniendo en cuenta la comparación realizada en el estudio la diferencia entre las normalizaciones obtenidas por los diferentes métodos es muy pequeña y para el caso de estudio de esta investigación, no representa un cambio en la ordenación de criterios o alternativas. Por ende, en este trabajo se tiene en cuenta el proceso de columnas normalizadas con promedio de filas difusas con normalización y división difusa (FR1VINC +FNFD) explicado en el capítulo 3: Definición de la metodología de análisis, apartado 3.3.1 Consistencia de las matrices de comparación pareadas.

G. Anexo: Tablas de preferencias

RESULTADOS FAHP+GA+TOPSIS

Selección de pesos FAHP

Criterios globales:

Tabla 17. Ponderación de los criterios globales por parte de los expertos para evaluación FAHP.

	Pesos experto 1	Pesos experto 2	Pesos experto 3	Total	AG
CG1/CG2	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)
CG1/CG3	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
CG1/CG4	(1/8,1/7,1/6)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)
CG2/CG3	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)
CG2/CG4	(1/8,1/7,1/6)	(1,2,3)	(6,7,8)	(1,2,3)	(3,4,5)
CG3/CG4	(1/6,1/5,1/4)	(3,4,5)	(2,3,4)	(2,3,4)	(2,3,4)
Consistencia				0.14	0.07

Criterios locales:

Tabla 18. Ponderación criterios locales por parte de los expertos para evaluación FAHP.

	Pesos Experto 1	Pesos Experto 2	Pesos Experto 3	Total
C1/C2	(2,3,4)	(1/6,1/5,1/4)	(1,2,3)	(1,2,3)
C1/C3	(1,2,3)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)
C1/C4	(4,5,6)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)
C1/C5	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)
C1/C6	(1/4,1/3,1/2)	(3,4,5)	(3,4,5)	(2,3,4)
C1/C7	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(3,4,5)	(1,2,3)
C1/C8	(1,1,1)	(1,1,1)	(4,5,6)	(1,2,3)
C1/C9	(2,3,4)	(2,3,4)	(4,5,6)	(3,4,5)
C1/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C2/C3	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C2/C4	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)
C2/C5	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C2/C6	(1/4,1/3,1/2)	(3,4,5)	(2,3,4)	(1,2,3)
C2/C7	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)
C2/C8	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)

C2/C9	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C2/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)
C3/C4	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,2,3)
C3/C5	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C3/C6	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C3/C7	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)
C3/C8	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)
C3/C9	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C3/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)
C4/C5	(1,1,1)	(1,1,1)	(3,4,5)	(1,2,3)
C4/C6	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(3,4,5)	(1,2,3)
C4/C7	(1/3,1/2,1)	(1/6,1/5,1/4)	(3,4,5)	(1,2,3)
C4/C8	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(3,4,5)	(1,2,3)
C4/C9	(1,1,1)	(1,1,1)	(3,4,5)	(1,2,3)
C4/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C5/C6	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)
C5/C7	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)
C5/C8	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C5/C9	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C5/C10	(1/6,1/5,1/4)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)
C6/C7	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C6/C8	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)
C6/C9	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,2,3)
C6/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C7/C8	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
C7/C9	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C7/C10	(1/6,1/5,1/4)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)
C8/C9	(1,1,1)	(3,4,5)	(2,3,4)	(2,3,4)
C8/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)
C9/C10	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
Consistencia				0.071

Pesos de criterios a partir de Fuzzy AHP

Tabla 19. Pesos de criterios obtenidos a partir de la implementación de la metodología FAHP.

Criterios globales	Ponderación global	Criterios locales	Ponderación local	Ponderación final
CG1. Impacto en la producción	0.19087521	C1. Factor de recobro	0.17448432	0.03330473
		C2. VPN	0.11450946	0.02185702
		C3. TIR	0.11943031	0.02279629
CG2. Complejidad de implementación	0.46521841	C4. Madurez de la tecnología	0.10874697	0.0207571
		C5. Complejidad manejo de químicos en superficie	0.07713787	0.03588595
CG3. Criterios ambientales	0.24078173	C6. Restricciones ambientales adicionales	0.07606727	0.0353879

		C7. Impactos sobre el suelo	0.09415449	0.02267068
		C8. Contribución a la disminución de emisiones de CO ₂	0.09098064	0.02190648
CG4. Criterios sociales	0.10312465	C9. Generación de empleos en la comunidad	0.05512538	0.01327318
		C10. Generación de conflictos legislativos	0.0893633	0.00921556

Selección de valores de criterios respecto a cada alternativa usando TOPSIS, teniendo en cuenta los pesos provenientes de FAHP

Tabla 20. Valores de las alternativas respecto a cada criterio y sus respectivos pesos provenientes de FAHP.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	Pesos
C1	64	92	78	65	95	82	66	96	90	0.03330473
C2	2052367	3945567	4910173	2127446	4129875	5155917	2202525	4191311	5647406	0.02185702
C3	30.64	27.53	30.16	31.12	28.00	30.78	31.59	28.16	32.02	0.02279629
C4	20	15	20	83.33	40	50	35	25	30	0.0207571
C5	83.33	66.67	66.67	68.33	83.33	83.33	66.67	66.67	66.67	0.03588595
C6	56.67	66.67	66.67	20	40	40	40	50	50	0.0353879
C7	46.67	46.67	46.67	20	20	20	20	30	30	0.02267068
C8	10	100	50	15	100	50	15	100	50	0.02190648
C9	20	66.67	66.67	30	66.67	66.67	30	66.67	66.67	0.01327318
C10	50	66.67	66.67	30	56.67	56.67	50	66.67	66.67	0.00921556

RESULTADOS PARA AHP

Selección de pesos

Criterios generales AHP:

Tabla 21. Ponderación de los criterios globales por parte de los expertos para evaluar la metodología AHP.

	Pesos experto 1	Pesos experto 2	Pesos experto 3	
CG1/CG2	1/5	1/3	1/2	1/3
CG1/CG3	1/5	1/5	3	1
CG1/CG4	1/7	2	4	2
CG2/CG3	1/2	1/3	4	2

CG2/CG4	1/7	2	4	2
CG3/CG4	1/5	4	5	3
Consistencia				0.066

Sub-criterios AHP:

Tabla 22. Ponderación de criterios locales por parte de los expertos para evaluar metodología AHP.

	Pesos Experto 1	Pesos Experto 2	Pesos Experto 3	Total
C1/C2	3	1/5	2	2
C1/C3	2	1/5	1/7	1
C1/C4	5	2	1/2	3
C1/C5	2	2	2	2
C1/C6	1/3	4	4	3
C1/C7	1/2	1/3	4	2
C1/C8	1	1	5	2
C1/C9	3	3	5	4
C1/C10	1/5	1	1	1
C2/C3	1	1	1	1
C2/C4	1/2	3	2	2
C2/C5	1	3	3	2
C2/C6	1/3	4	3	2
C2/C7	1/2	1/3	3	1
C2/C8	1	1/3	3	1
C2/C9	1	3	3	2
C2/C10	1/5	2	1	1
C3/C4	1/2	3	1	2
C3/C5	1	3	3	2
C3/C6	1/3	3	3	2
C3/C7	1/2	1/3	3	1
C3/C8	1	1/3	3	1
C3/C9	1	3	3	2
C3/C10	1/5	2	1	1
C4/C5	1	1	4	2
C4/C6	1/3	2	4	2
C4/C7	1/2	1/5	4	2
C4/C8	1	¼	4	2
C4/C9	1	1	4	2
C4/C10	1/5	1	1	1
C5/C6	1/3	3	1	1
C5/C7	½	1/2	1	1/2
C5/C8	1	1/2	1	1
C5/C9	1	3	3	2
C5/C10	1/5	3	1	1
C6/C7	1/3	1	1	1
C6/C8	1	1/3	1	1
C6/C9	1	1/2	3	2
C6/C10	1/5	1/2	1	1
C7/C8	1	1	1	1
C7/C9	1	3	3	2
C7/C10	1/5	3	1	1

C8/C9	1	4	3	3
C8/C10	1/5	2	1	1
C9/C10	1/5	1	1	1
Consistencia				0.034

Tabla 23. Pesos de criterios obtenidos a partir de la implementación de la metodología AHP.

Criterios globales	Ponderación global	Criterios locales	Ponderación local	Ponderación final
CG1. Impacto en la producción	0.20136114	C1. Factor de recobro	0.17706984	0.03565499
		C2. VPN	0.11447757	0.02305133
		C3. TIR	0.12292828	0.02475298
CG2. Complejidad de implementación	0.42139111	C4. Madurez de la tecnología	0.1090739	0.02196325
		C5. Complejidad manejo de químicos en superficie	0.07128998	0.03004096
CG3. Criterios ambientales	0.25046828	C6. Restricciones ambientales adicionales	0.07301854	0.03076936
		C7. Impactos sobre el suelo	0.09453754	0.02367866
		C8. Contribución a la disminución de emisiones de CO ₂	0.0924029	0.023144
CG4. Criterios sociales	0.12677947	C9. Generación de empleos en la comunidad	0.04952382	0.01240415
		C10. Generación de conflictos legislativos	0.09567762	0.01212996

Calificación de alternativas teniendo en cuenta cada criterio.

Tabla 24. Ponderación de alternativas por parte de los expertos teniendo en cuenta cada criterio.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1-A2	1/4	1/4	1/3	2	1	1	2	1/5	1/3	1
A1-A3	1/2	1/2	1/2	3	1	1	2	1/4	1/3	1
A1-A4	1	1	1/2	1/3	3	2	3	1	1	3
A1-A5	1/4	1/3	1/3	2	3	2	3	1/5	1/3	3
A1-A6	1	1	1	1	3	2	3	1/4	1/3	3
A1-A7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A1-A8	1/4	1/3	1/3	2	1	1	1	1/5	1/4	1
A1-A9	1/3	1/3	1/3	2	1	1	2	1/4	1/3	1

A2-A3	2	1	1	1	1	1	1	3	2	1
A2-A4	4	3	3	1/4	3	2	2	5	3	3
A2-A5	1	1	1	1	3	2	2	1	1	3
A2-A6	3	2	2	1/2	3	2	2	3	2	3
A2-A7	3	3	3	1	1	1	1	4	4	1
A2-A8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A2-A9	2	1	1	1	1	1	1/2	3	1	1
A3-A4	2	2	2	1/4	3	2	2	4	3	3
A3-A5	1/3	1	1	1	3	2	2	1/3	1	3
A3-A6	1	1	1	1	3	2	2	1	1	3
A3-A7	3	2	2	1	1	1/2	1	3	3	1
A3-A8	1	1	1	1	1	1/2	2	1/5	1	1
A3-A9	1	1	1	1	1	1/2	1	1	1	1
A4-A5	1/4	1/2	1/2	3	1	1	1	1/5	1/3	1
A4-A6	1	1	1	3	1	1	1	1/4	0,5	1
A4-A7	1	1	1	4	1/3	1/2	1/2	1	1	1/2
A4-A8	1/3	1/3	1/3	5	1/4	1/2	1/3	1/5	1/3	1/4
A4-A9	1/2	1/2	1	5	1/4	1/2	1/2	1/4	1/3	1/4
A5-A6	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1
A5-A7	4	4	3	2	1	1/2	1/3	6	4	1/2
A5-A8	2	2	3	2	1/2	1/2	1/2	2	3	1/4
A5-A9	3	2	3	2	1/2	1/2	1/3	3	2	1/4
A6-A7	2	2	2	3	1/3	1/2	1/2	3	3	1/4
A6-A8	1/2	1	1	3	1/3	1/2	2	1/2	1	1/4
A6-A9	1	2	2	3	1/3	1/2	1/2	1	2	1/4
A7-A8	2	1/2	1/2	1	1	1	2	2	1/2	1
A7-A9	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1
A8-A9	2	1	1	1	1	1	1	3	2	1

Ponderación de cada alternativa respecto a cada criterio.

Tabla 25. Pesos de importancia obtenidos para cada alternativa respecto a cada criterio a partir de la implementación de AHP.

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
-------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

A1	0.04966 998	0.05765 073	0.05569 154	0.13256 078	0.14345 796	0.13227 513	0.18544 398	0.03233 174	0.04487 647	0.14005 845
A2	0.18997 524	0.16337 605	0.15881 577	0.06895 529	0.14345 796	0.13227 513	0.11051 863	0.19905 364	0.17194 53	0.14005 845
A3	0.10311 383	0.12565 601	0.12579 085	0.07326 901	0.14345 796	0.10846 561	0.12706 435	0.09090 14	0.12847 598	0.14005 845
A4	0.05188 47	0.06384 727	0.07455 152	0.30471 626	0.04520 494	0.06613 757	0.05837 807	0.03233 174	0.04837 068	0.04649 694
A5	0.22984 706	0.16883 383	0.18106 77	0.09890 998	0.06270 991	0.06613 757	0.05506 706	0.22511 243	0.17897 743	0.04649 694
A6	0.07525 974	0.11446 202	0.11274 206	0.13399 246	0.04781 932	0.06613 757	0.07547 209	0.09538 57	0.13244 423	0.04266 553
A7	0.07455 658	0.07076 041	0.07038 533	0.06815 23	0.13038 607	0.14285 714	0.15591 681	0.07433 822	0.06081 048	0.13458 707
A8	0.13725 377	0.12931 599	0.12660 322	0.05972 196	0.14175 293	0.14285 714	0.10623 427	0.17153 959	0.13385 951	0.15478 909
A9	0.08843 91	0.10609 77	0.09435 202	0.05972 196	0.14175 293	0.14285 714	0.12590 475	0.07900 553	0.10023 993	0.15478 909

Ranking general utilizando AHP

Tabla 26. Ranking de alternativas a partir de la metodología AHP.

Ranking	Alternativa	Peso final
1	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0,03542045
2	CO ₂ + EC6002A-NALCO	0,03195825
3	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	0,03099779
4	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0,02734809
5	Flue-Gas +Nanocápsulas S20 NC	0,02583092
6	Gas de recicló + Nanocápsulas S20 NC	0,0236403
7	Gas de recicló+Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0,02316445
8	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	0,02068212
9	Gas de recicló + EC6002A-NALCO	0,01854726

RESULTADOS AHP+TOPSIS

Tabla 27. Valores de las alternativas respecto a cada criterio y sus respectivos pesos provenientes de AHP.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	Pesos
C1	64	92	78	65	95	82	66	96	90	0.0356549 9
C2	205236 7	394556 7	491017 3	212744 6	412987 5	515591 7	220252 5	419131 1	564740 6	0.0230513 3
C3	30.64	27.53	30.16	31.12	28.00	30.78	31.59	28.16	32.02	0.0247529 8
C4	20	15	20	83.33	40	50	35	25	30	0.0219632 5
C5	83.33	66.67	66.67	68.33	83.33	83.33	66.67	66.67	66.67	0.0300409 6
C6	56.67	66.67	66.67	20	40	40	40	50	50	0.0307693 6

C7	46.67	46.67	46.67	20	20	20	20	30	30	0.02367866
C8	10	100	50	15	100	50	15	100	50	0.023144
C9	20	66.67	66.67	30	66.67	66.67	30	66.67	66.67	0.01240415
C10	50	66.67	66.67	30	56.67	56.67	50	66.67	66.67	0.01212996

Tabla 28. Ranking de alternativas a partir de la metodología AHP+TOPSIS.

Ranking	Alternativa	Peso final
1	CO ₂ + EC6002A-NALCO	0.6182
2	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	0.5752
3	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO	0.5664
4	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	0.5202
5	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	0.4665
6	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.4209
7	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	0.3707
8	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.3275
9	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.1143

RESULTADOS TOPSIS

Tabla 29. Valores de las alternativas respecto a cada criterio y sus respectivos pesos dados por los expertos sin tener en cuenta ningún método de ponderación.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	Pesos
C1	64	92	78	65	95	82	66	96	90	0,23809524
C2	2052367	3945567	4910173	2127446	4129875	5155917	2202525	4191311	5647406	0,17857143
C3	30.64	27.53	30.16	31.12	28.00	30.78	31.59	28.16	32.02	0,11904762
C4	20	15	20	83.33	40	50	35	25	30	0,05952381
C5	83.33	66.67	66.67	68.33	83.33	83.33	66.67	66.67	66.67	0,05952381
C6	56.67	66.67	66.67	20	40	40	40	50	50	0,0952381
C7	46.67	46.67	46.67	20	20	20	20	30	30	0,05952381
C8	10	100	50	15	100	50	15	100	50	0,05952381
C9	20	66.67	66.67	30	66.67	66.67	30	66.67	66.67	0,0952381
C10	50	66.67	66.67	30	56.67	56.67	50	66.67	66.67	0,03571429

Tabla 30. Ranking de alternativas a partir de la metodología TOPSIS.

Ranking	Alternativa	Peso final
1	Flue-Gas + EC6002A-NALCO	0.675
2	CO ₂ + EC6002A-NALCO	0.646
3	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	0.644
4	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	0.59

5	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.5
6	CO2+ Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.499
7	Gas de reciclo + EC6002A-NALCO	0.416
8	Gas de reciclo + Nanocápsulas S20 NC	0.273
9	Gas de reciclo + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0.094

RESULTADOS FAHP

Calificación de alternativas teniendo en cuenta cada criterio.

Tabla 31. Ponderación de alternativas por parte de los expertos teniendo en cuenta cada criterio.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1-A2	(1/5,1/4,1/3)	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
A1-A3	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
A1-A4	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)
A1-A5	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)
A1-A6	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)
A1-A7	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
A1-A8	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(1/5,1/4,1/3)	(1,1,1)
A1-A9	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
A2-A3	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,1,1)
A2-A4	(3,4,5)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1/5,1/4,1/3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(4,5,6)	(2,3,4)	(2,3,4)
A2-A5	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)
A2-A6	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(2,3,4)
A2-A7	(2,3,4)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(3,4,5)	(3,4,5)	(1,1,1)
A2-A8	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
A2-A9	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)
A3-A4	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1/5,1/4,1/3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(3,4,5)	(2,3,4)	(2,3,4)
A3-A5	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)
A3-A6	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)
A3-A7	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,1,1)
A3-A8	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1,1,1)
A3-A9	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
A4-A5	(1/5,1/4,1/3)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
A4-A6	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)
A4-A7	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(3,4,5)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)

A4-A8	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(6,5,4)	(1/5,1/4,1/3)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/5,1/4,1/3)
A4-A9	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(6,5,4)	(1/5,1/4,1/3)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1/5,1/4,1/3)
A5-A6	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)
A5-A7	(3,4,5)	(3,4,5)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(5,6,7)	(3,4,5)	(1/3,1/2,1)
A5-A8	(1,2,3)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1/5,1/4,1/3)
A5-A9	(2,3,4)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1/5,1/4,1/3)
A6-A7	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1/5,1/4,1/3)
A6-A8	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)
A6-A9	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1/5,1/4,1/3)
A7-A8	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)
A7-A9	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)
A8-A9	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,1,1)

Ranking general utilizando FAHP: para facilidad de la evaluación de este método, se partió de las matrices mejoradas con el algoritmo genético mostradas anteriormente, teniendo en cuenta que el método solo permite matrices consistentes.

Tabla 32. Ranking de alternativas a partir de la metodología FAHP.

Ranking	Alternativa	Peso final
1	CO ₂ + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0,03337989
2	CO ₂ + Nanocápsulas S20 NC	0,02958538
3	Flue-Gas + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0,02949044
4	Flue-Gas + Nanocápsulas S20 NC	0,02777002
5	Gas de recicló + Nanocápsulas S20 NC	0,02674408
6	Gas de recicló + Nanopartículas de sílice con fluorosurfactante	0,02378611
7	CO ₂ + DANY	0,02264213
8	Flue-Gas + DANY	0,02055441
9	Gas de recicló + DANY	0,0198489

H. Anexo: Tablas de sensibilidad

Caso 2-5: Se fijan los pesos locales y se varían los pesos globales, anulando el aporte de un criterio.

Tabla 33 Caso 2 de análisis de sensibilidad.

Caso 2										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos globales	0			0.15		0.25			0.60	
Pesos locales	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Pesos finales	0	0	0	0,0031 1357	0,0053 8289	0,0088 4698	0,0056 6767	0,0054 7662	0,0079 6391	0,0055 2934

Tabla 34 Caso 3 de análisis de sensibilidad

Caso 3										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos globales	0			0.25		0.60			0.15	
Pesos locales	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Pesos finales	0	0	0	0,0051 8928	0,0089 7149	0,0212 3274	0,0136 0241	0,0131 4389	0,0019 9098	0,0013 8233

Tabla 35 Caso 4 de análisis de sensibilidad

Caso 4										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos globales	0			0.60		0.15			0.25	
Pesos locales	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Pesos finales	0	0	0	0,0124 5426	0,0215 3157	0,0053 0819	0,0034 006	0,0032 8597	0,0033 183	0,0023 0389

Tabla 36 Caso 5 de análisis de sensibilidad

Caso 5										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos globales	0.15			0		0.25			0.60	
Pesos locales	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.020 7571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Pesos finales	0,0049 9571	0,0032 7855	0,0034 1944	0	0	0,0088 4698	0,0056 6767	0,0054 7662	0,0079 6391	0,0055 2934

Tabla 37 Caso 6 de análisis de sensibilidad

Caso 6										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos globales	0.25			0		0.60			0.15	
Pesos locales	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.020 7571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Pesos	0,0083 2618	0,0054 6426	0,0056 9907	0	0	0,0212 3274	0,0136 0241	0,0131 4389	0,0019 9098	0,0013 8233

final es										
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabla 38 Caso 7 de análisis de sensibilidad

Caso 7										
Crite rios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pes os glob ales	0.60			0		0.15			0.25	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pes os local es	0.033 30473	0.021 85702	0.022 79629	0.020 7571	0.035 88595	0.035 3879	0.022 67068	0.021 90648	0.013 27318	0.009 21556
Pes os final es	0,019 98284	0,013 11421	0,013 67777	0	0	0,005 30819	0,003 4006	0,003 28597	0,003 3183	0,002 30389

Tabla 39 Caso 8 de análisis de sensibilidad

Caso 8										
Crite rios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Peso s glob ales	0.15			0.25		0			0.60	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Peso s local es	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.035 3879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Peso s final es	0,0049 9571	0,0032 7855	0,0034 1944	0,0051 8928	0,0089 7149	0	0	0	0,0079 6391	0,0055 2934

Caso 9										
Crite rios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Peso s glob ales	0.25			0.60		0			0.15	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Peso s local es	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.035 3879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Peso s	0,0083 2618	0,0054 6426	0,0056 9907	0,0124 5426	0,0215 3157	0	0	0	0,0019 9098	0,0013 8233

final										
-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabla 40 Caso 10 de análisis de sensibilidad

Caso 10										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Peso s glob ales	0.60			0.15		0			0.25	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Peso s local es	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.035 3879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Peso s final es	0,0199 8284	0,0131 1421	0,0136 7777	0,0031 1357	0,0053 8289	0	0	0	0,0033 183	0,0023 0389

Tabla 41 Caso 11 de análisis de sensibilidad

Caso 11										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Peso s glob ales	0.15			0.25		0.60			0	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Peso s local es	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Peso s final es	0,0049 9571	0,0032 7855	0,0034 1944	0,0051 8928	0,0089 7149	0,0212 3274	0,0136 0241	0,0131 4389	0	0

Tabla 42 Caso 12 de análisis de sensibilidad

Caso 12										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Peso s glob ales	0.25			0.60		0.15			0	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Peso s local es	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556

Pesos finales	0,0083 2618	0,0054 6426	0,0056 9907	0,0124 5426	0,0215 3157	0,0053 0819	0,0034 006	0,0032 8597	0	0
----------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	---------------	----------------	---	---

Tabla 43 Caso 13 de análisis de sensibilidad

Caso 13										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pesos globales	0.60			0.15		0.25			0	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos locales	0.0333 0473	0.0218 5702	0.0227 9629	0.0207 571	0.0358 8595	0.0353 879	0.0226 7068	0.0219 0648	0.0132 7318	0.0092 1556
Pesos finales	0,0199 8284	0,0131 1421	0,0136 7777	0,0031 1357	0,0053 8289	0,0088 4698	0,0056 6767	0,0054 7662	0	0

Caso 14-18: Se fijan los pesos globales y se varía de a dos pesos globales por caso.

Tabla 44 Caso 14 de análisis de sensibilidad

Caso 14										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pesos globales	0.19087521			0.46521841		0.24078173			0.10312465	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos locales	0,0077 3196	0,0128 866	0,0257 732	0,0515 4639	0,0773 1959	0,1030 9278	0,1288 6598	0,1546 3918	0,2061 8557	0,2319 5876
Pesos finales	0,0014 7584	0,0024 5973	0,0049 1946	0,0239 8033	0,0359 705	0,0248 2286	0,0310 2857	0,0372 3429	0,0212 6281	0,0239 2067

Tabla 45 Caso 15 de análisis de sensibilidad

Caso 15										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pesos globales	0.19087521			0.46521841		0.24078173			0.10312465	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10

Pesos locales	0,0408 1633	0,0653 0612	0,0897 9592	0,1367 3469	0,1571 4286	0,0061 2245	0,1346 9388	0,0938 7755	0,1591 8367	0,1163 2653
Pesos finales	0,0077 9082	0,0124 6532	0,0171 3981	0,0636 115	0,0731 0575	0,0014 7417	0,0324 3182	0,0226 04	0,0164 1576	0,0119 9613

Tabla 46 Caso 16 de análisis de sensibilidad

Caso 16										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pesos globales	0.19087521			0.46521841		0.24078173			0.10312465	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos locales	0,1647 8555	0,1783 2957	0,1467 2686	0,1828 4424	0,0270 8804	0,0225 7336	0,0474 0406	0,0293 4537	0,1760 7223	0,0248 307
Pesos finales	0,0314 5348	0,0340 3869	0,0280 0652	0,0850 6251	0,0126 0185	0,0054 3525	0,0114 1403	0,0070 6583	0,0181 5739	0,0025 6066

Tabla 47 Caso 17 de análisis de sensibilidad

Caso 17										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pesos globales	0.19087521			0.46521841		0.24078173			0.10312465	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos locales	0,0813 9535	0,1674 4186	0,0906 9767	0,0953 4884	0,0372 093	0,2069 7674	0,1651 1628	0,0883 7209	0,0348 8372	0,0325 5814
Pesos finales	0,0155 3635	0,0319 605	0,0173 1194	0,0443 5803	0,0173 1045	0,0498 3622	0,0397 5698	0,0212 7839	0,0035 9737	0,0033 5755

Tabla 48 Caso 18 de análisis de sensibilidad

Caso 18										
Criterios	CG1			CG2		CG3			CG4	
Pesos globales	0.19087521			0.46521841		0.24078173			0.10312465	

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos locales	0,1390 7285	0,0794 702	0,1324 5033	0,0811 2583	0,0298 0132	0,1291 3907	0,0662 2517	0,1043 0464	0,1059 6026	0,1324 5033
Pesos finales	0,0265 4556	0,0151 6889	0,0252 8148	0,0377 4123	0,0138 6412	0,0310 9433	0,0159 4581	0,0251 1465	0,0109 2712	0,0136 5889

I. Anexo: Metodología de evaluación financiera para la obtención de parámetros económicos.

Los valores utilizados en la aplicación de la metodología se obtuvieron a partir de la evaluación financiera preliminar del proyecto Plan Nacional para el Potenciamiento de la Tecnología CEOR con gas mejorado químicamente – COLCIENCIAS, realizada por el equipo financiero del proyecto. En esta etapa se realizó un Flujo de Caja Libre para comprender la estructura del proyecto y tener un punto de partida para poder tomar decisiones que beneficien al proyecto. Algunas de las variables que se utilizaron en esta etapa fueron: VPN, TIR, PAYBACK, CAPEX, OPEX, entre otras, las cuales pudieron determinar los retornos que puede llegar a tener del proyecto.

Con base en lo anterior, en la Tabla 49 se muestra la estructura del flujo de caja libre utilizado para la evaluación del proyecto:

Tabla 49. Flujo de Caja Libre

Concepto
(+) Ingresos [2019USD]
(-) Gastos [2019USD]
(=) EBITDA
(-) Depreciación
(=) EBIT
(-) Intereses
(=) EBT

(-) Impuestos
(+) Activos no vendidos
(=) Utilidad Neta
(-) CAPEX
(+) Depreciación
(=) Flujo de caja libre
(-) Servicio a la deuda
(=) Flujo Inversionistas
VPN
TIR
PAYBACK

Para la determinación del CAPEX de la planta de inyección se realizó un cálculo estimado con factor de escalamiento para determinar el valor de los compresores, adicionalmente se tuvieron en cuenta los costos directos de capital que afectaban la estimación de los CAPEX del proyecto (Instrumentación y control, infraestructura, conexiones eléctricas, preparación del sitio, trabajo civil, electrónica, tubería, entre otros). En cuanto a los costos indirectos de capital se realizaron estimaciones conservadoras a los precios de contingencias, gastos generales, ingeniería y puesta en marcha con el fin de que las estimaciones se realizaran lo más cercano posible a la realidad del proyecto. Para la evaluación del proyecto se asumen los CAPEX al 10%.

En cuanto a la determinación de los OPEX inicialmente se realizaron diferentes suposiciones, por ejemplo, el factor de capacidad de la planta (85%), promedio de horas operacionales al año, consumo eléctrico (basados en la cotización del precio en bolsa de la electricidad), y volumen de los químicos utilizados en la inyección. Para el caso de los costos operativos fijos se tuvieron en cuenta los costos de mantenimiento anual de la planta, costo directo por labor, costos administrativos de soporte y generales.

Análisis indicadores

El Valor Presente Neto (VPN) del proyecto se calculó considerando la suma del valor presente de los flujos de efectivo que se esperan recibir en diferentes periodos, esto

descontado a la tasa WACC que para la realización del proyecto se tomó 17.14%. El VPN permitió determinar la viabilidad preliminar del proyecto y de cada una de las alternativas a nivel financiero.

Teniendo en cuenta que la Tasa Interna de Retorno (TIR) corresponde a la rentabilidad que se puede obtener considerando la inversión realizada inicialmente, para la evaluación del proyecto se puede considerar que se tuvo una TIR moderada con buenos resultados que indicó que el proyecto a realizar es viable financieramente, teniendo en cuenta las diferentes alternativas.

En cuanto al periodo de recuperación de la inversión o Payback, para las diferentes alternativas evaluadas se obtuvo un promedio de 2,5 años lo que se puede considerar muy rentable debido a que la inversión se está recuperando en muy poco tiempo considerando la complejidad y dimensión del proyecto.

J. Anexo: Perfil de los expertos

En esta sección se presenta el perfil de cada uno de los expertos que intervinieron durante el proceso del caso de estudio para la selección del mejor tratamiento químico para EOR. Se presenta su formación académica, su experiencia laboral y área de trabajo.

Experto 1: Ingeniero de petróleo de la Universidad Nacional de Colombia con 17 años de experiencia en la industria con énfasis en diagnóstico y control de daño de formación, estimulación y recobro mejorado con gas. Lidera el portafolio de tecnologías de productividad de una compañía del sector hidrocarburos en Colombia, fortaleciendo las actividades de investigación y desarrollo en modelamiento y síntesis de aplicaciones para el control de daño de formación.

Experto 2: Ingeniero de petróleos de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería de Petróleos, activo del grupo de investigación en Dinámicas de flujo y transporte en medios porosos. Cuenta con experiencia en diferentes empresas del sector hidrocarburo en diseño de aplicación de nuevas tecnologías en campos colombianos, control de calidad de lechadas de cemento y supervisión de operaciones de cementación primaria y remedial en pozos petroleros.

Experto 3: Ingeniero de petróleos de la Universidad Surcolombiana de Colombia, con conocimientos en recobro mejorado, simulación de yacimientos y producción de hidrocarburos. Cuenta con experiencia en el área de optimización de la producción y operaciones ALS en Frontera Energy, así como investigador del grupo de investigación en Dinámicas de flujo y transporte en medios porosos en las líneas de modelamiento numérico

de procesos de inyección vapor usando nanofluidos, y estabilidad de espumas a altas temperaturas en medios porosos.

7. Bibliografía

- [1] B. Liang *et al.*, “Novel Enhanced-Oil-Recovery Decision-Making Work Flow Derived From the Delphi-AHP-TOPSIS Method : A Case Study,” no. October 2015, pp. 20–22, 2018.
- [2] J. Salager, “Recuperación mejorada del petróleo.” Universidad de los Andes, 2005.
- [3] J. Carlos and S. Tamayo, “Metodología para la identificación de pozos con oportunidades de incremento de producción en campos maduros universidad central del Ecuador,” Universidad Central del Ecuador, 2013.
- [4] M. L. Salamanca, “Ingeniería de Yacimientos,” 2014.
- [5] R. Al-Mjeni, S. Arora, and P. Cherukupalli, “Has the time come for EOR?,” *Oilf. Rev.*, vol. 22, no. 4.
- [6] M. Paris De Ferrer, *Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos*. 2001.
- [7] A. A. Olajire, “Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges,” *Energy*, vol. 77, pp. 963–982, Dec. 2014.
- [8] ECOPETROL, “Ecopetrol: Planes y programas E&P 2018,” 2018.
- [9] A. Y. Zekri and K. K. Jerbi, “Economic evaluation of enhanced oil recovery,” *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 57, no. 3, pp. 259–267, 2002.
- [10] C. Romero, *Análisis de las Decisiones Multicriterio*. 1996.
- [11] C. M. Aparicio González, “Desarrollo de un algoritmo de decisión multicriterio para la gestión de listas de espera en la solicitud de holter,” 2015.
- [12] J. F. Raigoza, “Aplicación de Métodos Multi-criterio (MCDA) para planeamiento energético de largo plazo en la industria del cemento,” p. 69, 2016.
- [13] EcuRed, “Análisis multicriterio - EcuRed.” [Online]. Available: https://www.ecured.cu/Análisis_multicriterio. [Accessed: 07-Nov-2018].
- [14] V. Belton and T. J. Stewart, *Multiple Criteria Decision Analysis*. Boston, MA: Springer US, 2002.
- [15] J. Montesinos Valera, “Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP- BOCR de

- análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento , rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias .,” 2015.
- [16] A. Guitouni and J.-M. Martel, “Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 109, no. 2, pp. 501–521, Sep. 1998.
- [17] M. Fontana, “Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil,” 2015.
- [18] A. Ishizaka and P. Nemery, *Multi-Criteria Decision Analysis Methods and Software*. 2013.
- [19] M. Velasquez and P. T. Hester, “An analysis of multi-criteria decision making methods,” *Int. J. Oper. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 49–58, 2015.
- [20] A. Martin, J. Girija, E. J. Devi, and S. Senbagavalli, “A Survey on Fuzzy MCDM Methods and Its Applications,” *Am. J. Intell. Syst.*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [21] J. Ruiz, “MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO ELECTRE Y TOPSIS APLICADOS A LA ELECCIÓN DE UN DISPOSITIVO MÓVIL,” Universidad de Sevilla, 2015.
- [22] B. Ceballos, M. T. Lamata, D. Pelta, and J. M. Sanchez, “El método topsis relativo vs. Absoluto,” *Recta*, vol. 14, no. 2, pp. 181–192, 2013.
- [23] L. V. Thomas Saaty, “Models, Methods, Concepts Sc Applications of the Analytic Hierarchy Process,” 2001.
- [24] F. J. Ruvalcaba Coyaso, F. J. and A. Vermonden, A., “Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal,” *Univ. Empres.*, vol. 17, no. 29, pp. 239–256, 2016.
- [25] O. Ramírez Ramos, “CAPÍTULO 3 Lógica difusa,” 2008.
- [26] M. B. Ayhan, “A Fuzzy AHP Approach For Supplier Selection Problem: A Case Study In A Gearmotor Company,” *Int. J. Manag. Value Supply Chain.*, vol. 4, no. 3, pp. 11–23, 2013.
- [27] G. B. Toskano Hurtado, “El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores.,” Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2002.
- [28] I. A. León Téllez, S. L. Garcia Guevara, and Y. Guerra Vázquez, “A Model for Hierarchical Arrangement and Selection of Projects for Local Development Initiatives in Municipalities,” *Retos la Dir.*, vol. 12, no. 1, pp. 159–185, 2018.

- [29] R. W. SAATY, "The analytic hierarchy process-what it is and how it is used," 1987.
- [30] P. J. M. van Laarhoven and W. Pedrycz, "A fuzzy extension of Saaty's priority theory," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 11, no. 1–3, pp. 229–241, Jan. 1983.
- [31] J. J. Buckley and V. R. R. Uppuluri, "Fuzzy Hierarchical Analysis," in *Uncertainty in Risk Assessment, Risk Management, and Decision Making*, Boston, MA: Springer US, 1987, pp. 389–401.
- [32] D. Samanta, "Chapter 5 Defuzzification methods." pp. 1–7, 2001.
- [33] P. T. Chang and E. S. Lee, "The estimation of normalized fuzzy weights," *Comput. Math. with Appl.*, vol. 29, no. 5, pp. 21–42, 1995.
- [34] M. Khojastehmehr, M. Madani, and A. Daryasafar, "Screening of enhanced oil recovery techniques for Iranian oil reservoirs using TOPSIS algorithm," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 529–544, Nov. 2019.
- [35] M. F. Umaña Herrera and C. J. Gómez Osorio, "MODELO PARA LA GESTIÓN DE PROVEEDORES UTILIZANDO AHP DIFUSO," 2006.
- [36] L. W. Lake, *Enhanced oil recovery*. Old Tappan, NJ; Prentice Hall Inc., 1989.
- [37] ENERGY INSTITUTE LONDON, *Good plant design and operation for onshore carbon capture installations and onshore pipelines*. 2010.
- [38] J. G. Speight and J. G. Speight, "Unconventional gas," *Nat. Gas*, pp. 59–98, Jan. 2019.
- [39] NALCO, "Environmental impact assessment for capacity augmentation of specialty chemicals from 11,000 tpa to 22,000 tpa within the existing plant at konnagar, hooghly district, west bengal," 2018.
- [40] S. Betancur Márquez, "Desarrollo de Nanopartículas Basadas en Sílice para la Inhibición de la Precipitación/Deposición de Asfaltenos," Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [41] F. B. Cortés *et al.*, "Development and Evaluation of Surfactant Nanocapsules for Chemical Enhanced Oil Recovery (EOR) Applications.," *Molecules*, vol. 23, no. 7, Jun. 2018.
- [42] K. Semeco, "REPARACIÓN DE POZOS - QRA Análisis Probabilístico de Riesgo de la Actividad de Perforación y Reparación de Pozos," *Reliab. Risk Manag. S.A*, 2006.
- [43] J. J. Taber, F. D. Martin, and R. S. Seright, "EOR Screening Criteria Revisited - Part 1: Introduction to Screening Criteria and Enhanced Recovery Field Projects,"

- SPE Reserv. Eng.*, vol. 12, no. 03, pp. 189–198, 1997.
- [44] F. D. Martin, “Enhanced Oil Recovery for Independent Producers,” 2007.
- [45] C. A. Espinosa and K. J. Torres, “Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos , pesados y extra-pesados,” *J. Pet. Sci. Eng.*, p. 19, 2015.
- [46] A. Al-Adasani and B. Bai, “Recent Developments and Updated Screening Criteria of Enhanced Oil Recovery Techniques,” pp. 1–24, 2010.
- [47] J. J. Sheng, *Modern Chemical Enhanced Oil Recovery Theory and Practice*, vol. الحا العدد. 2011.
- [48] L. Velázquez, “Inyección de polímeros en yacimientos petroleros como método de recuperación mejorada,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- [49] Schlumberger Oilfield Glossary, “tensión interfacial - Schlumberger Oilfield Glossary.” [Online]. Available: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/i/interfacial_tension.aspx. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [50] ECOPETROL, “Recuperación Mejorada,” 2013.
- [51] Schlumberger Limited, “EOR Pilot Design | Schlumberger,” 2018. [Online]. Available: https://www.slb.com/services/technical_challenges/enhanced_oil_recovery/pilot_projects/construction_eor.aspx. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [52] E. J. Manrique, M. Izadi, C. D. Kitchen, and V. Alvarado, “Effective EOR Decision Strategies With Limited Data: Field Cases Demonstration,” *SPE Reserv. Eval. Eng.*, vol. 12, no. 04, pp. 551–561, 2009.
- [53] Schlumberger Limited, “Pilot Projects | Schlumberger,” 2018. [Online]. Available: https://www.slb.com/services/technical_challenges/enhanced_oil_recovery/pilot_projects.aspx. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [54] Schlumberger Limited, “Monitoring EOR | Schlumberger,” 2018. [Online]. Available: https://www.slb.com/services/technical_challenges/enhanced_oil_recovery/pilot_projects/monitoring.aspx. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [55] et al Aragonés-BeltránP, “An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects,” *Elsevier*, vol. 66, 2013.

- [56] M. Mellinas Fernandez, "Análisis comparativo de técnicas de generación eléctrica; AHP y TOPSIS fuzzificado," 2012.
- [57] A. Morillas, "Introducción al análisis de datos difusos," in *Introducción al análisis de datos difusos*, Edición el., 2006.
- [58] Nataša Sladoje, "Fuzzy Sets and Fuzzy Techniques." 2007.
- [59] D. Z. Saletic, D. M. Velasevic, and N. E. Mastorakis, "Analysis of Basic Defuzzification Techniques," 2001.
- [60] M. Gestal Pose, "Introducción a los Algoritmos Genéticos," no. Agosto. 2000.
- [61] S. C. D. F. José, "A Genetic Algorithm to Obtain Consistency in Analytic Hierarchy Process," *Brazilian J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 8, no. 1, pp. 55–64, 2011.
- [62] L. S. Wanderer, M. Karanik, and D. M. Carpintero, "Genetic Algorithms Applied to Inconsistent Matrices Correction in the Analytic Hierarchy Process (AHP)," *14th Argentine Symp. Artif. Intell. ASAI 2013 Genet.*, pp. 169–180, 2013.
- [63] R. K. Goyal and S. Kaushal, "Deriving crisp and consistent priorities for fuzzy AHP-based multicriteria systems using non-linear constrained optimization," *Fuzzy Optim. Decis. Mak.*, vol. 17, no. 2, pp. 195–209, Jun. 2018.
- [64] F. Moussaoui, M. Cherrared, M. A. Kacimi, and R. Belarbi, "A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings—Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 42, no. August 2017, pp. 622–636, 2018.
- [65] A. S. Milani, A. Shanian, R. Madoliat, and J. A. Nemes, "The effect of normalization norms in multiple attribute decision making models: a case study in gear material selection," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 29, no. 4, pp. 312–318, Apr. 2005.
- [66] S. Chakraborty, "A Simulation Based Comparative Study of Normalization Procedures in Multiattribute Decision Making," *6th WSEAS Int. Conf. Artif. Intell. Knowl. Eng. Data Bases*, vol. Proceeding, no. January, pp. 102–109, 2007.
- [67] A. Çelen, "Comparative Analysis of Normalization Procedures in TOPSIS Method: With an Application to Turkish Deposit Banking Market," *INFORMATICA*, vol. 25, no. 2, pp. 185–208, 2014.
- [68] L. M. Camarinha-Matos, A. J. Falcão, N. Vafaei, and S. Najdi, "Normalization Techniques for Multi-Criteria Decision Making: Analytical Hierarchy Process Case Study," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 470, no. October 2017, 2016.

- [69] S. Chakraborty and C.-H. Yeh, "A simulation comparison of normalization procedures for TOPSIS," no. July, pp. 1815–1820, 2009.
- [70] N. Vafaei, R. A. Ribeiro, and L. M. C. Matos, "Data normalisation techniques in decision making: case study with TOPSIS method," *Int. J. Inf. Decis. Sci.*, vol. 10, no. 1, p. 19, 2018.