

PROBLEMA DE RUTEO PARA EL TRANSPORTE DE CO₂

PROPUESTA AL PROBLEMA DE RUTEO DE DIÓXIDO DE CARBONO PARA SU
ALMACENAMIENTO EN FORMACIONES DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

Luis Miguel Salas Chia

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial

Director

Javier Eduardo Arias Osorio

Magister en Administración

Codirectora

María Isabel Sandoval Martínez

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga
2024

TABLA DE CONTENIDO

Definición del proyecto.....	10
Introducción	11
Cumplimiento de los objetivos	14
1. Generalidades del proyecto.....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.2. Objetivos.....	16
1.2.1. Objetivo General.....	16
1.2.2. Objetivos Específicos.....	16
1.3. Marco Teórico.....	17
1.3.1. Logística.....	17
1.3.2. Ruteo de vehículos.....	18
1.3.3. Métodos metaheurísticos	20
1.3.4. Búsqueda Tabú.....	20
1.3.5. Captura, uso y almacenamiento de carbono	21
1.4. Metodología de la investigación.....	25
1.4.1. Revisión de antecedentes	25
1.4.2. Formulación de modelos de optimización	25
1.4.3. Diseño y ejecución de algoritmos.....	26

1.4.4.	Análisis de escenarios	26
1.4.5.	Desarrollo de productos esperados	26
2.	Revisión de literatura	27
2.1.	Análisis bibliométrico	27
2.2.	Análisis preliminar de la literatura.....	34
2.3.	Marco de antecedentes	39
3.	Modelo del problema de ruteo de vehículos	41
3.1.	Formulación del modelo de ruteo	41
3.1.1.	Índices	41
3.1.2.	Conjuntos	42
3.1.3.	Parámetros.....	42
3.1.4.	Variables de decisión	42
3.1.5.	Función objetivo	42
3.1.6.	Restricciones	43
3.1.7.	Explicación del modelo.....	43
3.2.	Validación con herramienta de optimización GAMS	44
4.	Construcción del algoritmo de solución mediante Búsqueda Tabú.....	47
4.1.	Resultados obtenidos por los algoritmos	48
4.2.	Comparación en los resultados obtenidos entre los diferentes métodos.....	50
5.	Aplicación de un caso de estudio en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena	54

5.1.	Valle Medio del Magdalena.....	54
5.2.	Modelo de ruteo de vehículos para el transporte de CO2.....	56
5.3.	Localización de una facilidad de almacenamiento en campo.....	64
5.4.	Comparación en los tiempos de transporte de los diferentes escenarios	71
6.	Conclusiones.....	73
7.	Recomendaciones	74
	Referencias Bibliográficas	75

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Cadena de suministro de CO ₂ en un proceso CCUS.....	21
Figura 2 Métodos para la captura de CO ₂	22
Figura 3 Métodos de transporte de CO ₂	23
Figura 4 Principales opciones para el almacenamiento de CO ₂	24
Figura 5 Flujo de trabajo propuesto para el desarrollo del trabajo de grado.....	25
Figura 6 Comportamiento de datos encontrados a través de los años.....	28
Figura 7 Proceso de depuración de documentos duplicados	29
Figura 8 Proceso de depuración conforme el título y resúmenes.....	30
Figura 9 Diagrama de co-ocurrencia de palabras claves encontradas en los artículos.....	31
Figura 10 Diagrama de co-ocurrencia de palabras claves relacionadas con optimización.....	31
Figura 11 Frecuencia de publicación de los artículos analizados en revistas académicas	32
Figura 12 Frecuencia de las casas editoriales encontrados en los artículos	32
Figura 13 Diagrama de co-ocurrencia de países encontrados en los artículos	33
Figura 14 Rutas encontradas para el problema de validación con capacidad de 10 toneladas. 45	
Figura 15 Rutas encontradas para el problema de validación con capacidad de 20 toneladas. 45	
Figura 16 Rutas encontradas para el problema de validación con capacidad de 40 toneladas. 46	
Figura 17 Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros para las instancias evaluadas. 51	
Figura 18 Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú para las instancias evaluadas.	52
Figura 19 Ubicación del VMM en Colombia.....	55
Figura 20 Matriz origen destino de los nodos del caso de estudio.....	58
Figura 21 Representación de la localización de los nodos del caso de estudio.	58
Figura 22 Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton	61
Figura 23 Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton	62
Figura 24 Mejores rutas encontradas con el algoritmo búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton	63
Figura 25 Representación de la localización de los nodos en el activo petrolero	65
Figura 26 Representación de la localización del nuevo punto de almacenamiento.....	65

Figura 27 Matriz origen destino de los nodos del caso de estudio..... 66

Figura 28 Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton 68

Figura 29 Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton 69

Figura 30 Mejores rutas encontradas con el algoritmo búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton 70

TABLA DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Cumplimiento de los objetivos de la tesis de investigación	14
<i>Tabla 2</i> Comparación entre modalidades de transporte de carga	18
<i>Tabla 3</i> Ecuaciones de búsqueda empleadas en las bases de datos	27
<i>Tabla 4</i> Documentos encontrados con las ecuaciones de búsqueda	28
<i>Tabla 5</i> Ventajas y desventajas de los medios de transporte	35
<i>Tabla 6</i> Características del modelo CVRP en estudio	41
<i>Tabla 7</i> Localización de los puntos de validación del modelo	44
<i>Tabla 8</i> Matriz de distancias de los puntos de validación del modelo	44
<i>Tabla 9</i> Resultados obtenidos para los modelos evaluados	46
<i>Tabla 10</i> Pseudocódigo del algoritmo empleado para generar la ruta inicial	47
<i>Tabla 11</i> Pseudocódigo del algoritmo empleado para generar la ruta inicial	48
<i>Tabla 12</i> Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros	49
<i>Tabla 13</i> Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú	50
<i>Tabla 14</i> Comparación entre los valores obtenidos por los diferentes métodos empleados	53
<i>Tabla 15</i> Porcentaje de diferencia en los valores por los diferentes métodos empleados respecto al exacto	53
<i>Tabla 16</i> Localización de los nodos del caso de estudio	57
<i>Tabla 17</i> Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros	59
<i>Tabla 18</i> Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú	59
<i>Tabla 19</i> Comparación entre los valores obtenidos por los diferentes métodos empleados	60
<i>Tabla 20</i> Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros	66
<i>Tabla 21</i> Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú	67
<i>Tabla 22</i> Comparación entre los valores obtenidos por los diferentes métodos empleados	71
<i>Tabla 23</i> Comparación entre los dos puntos de almacenamiento del gas	72

Resumen

Título: Propuesta al problema de ruteo de dióxido de carbono para su almacenamiento en formaciones del Valle Medio Del Magdalena*

Autor: Luis Miguel Salas-Chia **

Palabras Clave: ruteo de vehículos, CCUS, búsqueda tabú

Descripción: En los últimos años a raíz del Acuerdo de París, el mundo se comprometió a disminuir los niveles de emisión de CO₂ antes de la era preindustrial. Por ello, se han considerado diferentes estrategias para alcanzar estos valores. El proceso de captura y almacenamiento de carbono ha sido un referente en los esfuerzos por alcanzar estas condiciones. Aunque la captura y el uso han tenido proyectos piloto en el país, el transporte ha sido una de las etapas que no ha tenido tanto estudio para su ejecución. Por lo anterior, en esta investigación se revisaron los medios de transporte que se han utilizado en proyectos de CCUS para identificar las posibilidades de su aplicación en un proyecto en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Como resultado, se encontró que el transporte terrestre fue la opción que más se adaptaba a un proyecto inicial de este tipo, ya que ofrece la mayor flexibilidad en la zona. Para poder evaluar el proceso de distribución del gas, se planteó un problema de ruteo de vehículos el cual fue analizado bajo técnicas exactas, heurísticas y metaheurísticas. De igual manera, se analizó la localización del almacenamiento intermedio del gas para ver su efecto sobre el proceso. Como resultado se encontró que la aplicación de un almacenamiento en campo permitió reducir en hasta un 84% de los tiempos de las rutas. A su vez, se logró identificar que el uso de métodos metaheurísticos logró permitir analizar modelos cuando se tiene una gran cantidad de nodos con errores de hasta 2.5%. Como resultado, el trabajo de investigación permitió generar un primer avance en el planteamiento de la distribución del dióxido de carbono de fuente a disposición ante un posible proyecto de CCUS.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Ingeniería Industrial. Director: Javier Eduardo Arias Osorio. Magíster en Administración. Codirector: Maria Isabel Sandoval Martinez. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos.

Abstract

Title: Proposal to the problem of carbon dioxide routing for storage in formations of the Middle Magdalena Valley*

Author: Luis Miguel Salas-Chia¹

Key Words: vehicle routing problem, CCUS, tabu search

Description: In recent years, because of the Paris Agreement, the world has committed to reducing CO₂ emission levels before the pre-industrial era. Therefore, different strategies have been considered to achieve these values. The process of carbon capture and storage has been a reference in the efforts to achieve these conditions. Although capture and use have had pilot projects in the country, transportation has been one of the stages that has not had so much study for its implementation. Therefore, this research reviewed the means of transportation that have been used in CCUS projects to identify the possibilities of their application in a project in the Middle Magdalena Valley basin. As a result, it was found that land transportation was the option that best suited an initial project of this type since it offers the greatest flexibility in the area. To evaluate the gas distribution process, a vehicle routing problem was proposed and analyzed under exact, heuristic and metaheuristic techniques. Likewise, the location of the intermediate gas storage was analyzed to see its effect on the process. As a result, it was found that the application of field storage allowed a reduction of up to 84% of the route times. At the same time, it was identified that the use of metaheuristic methods made it possible to analyze models when there are a large number of nodes with errors of up to 2.5%. As a result, the research work allowed to generate a first advance in the approach to the distribution of carbon dioxide from source to disposal before a possible CCUS project.

* Degree Work

¹Physic mechanics faculty. School of Industrial and Enterprise Studies. Industrial Engineering School. Industrial Engineering. Director: Javier Eduardo Arias Osorio, MBA. Co-director: Maria Isabel Sandoval Martinez. Master in Hydrocarbon Engineering.

Definición del proyecto

Título

Propuesta al problema de ruteo de dióxido de carbono para su almacenamiento en formaciones del Valle Medio del Magdalena

Modalidad

Trabajo de Investigación

Responsable

Luis Miguel Salas Chia

Nombre del grupo de investigación

Grupo de Investigación en Optimización y Organización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos - OPALO UIS

Otras entidades interesadas

Grupo de Investigación Recobro Mejorado – GRM UIS

Introducción

Según las últimas versiones de inventarios de emisiones zonales, las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en Colombia incrementaron alcanzando valores de 258 Mt_{CO₂eq} en el año 2012, donde las industrias de minas y energía y el sector de transporte representaron más de una cuarta parte. Posterior a esto, hacia el año 2017, el país reportó un aumento del 0.4% de las emisiones globales y fue categorizada en el puesto 19 de los países con mayor generación de gases de efecto invernadero (E. Yáñez et al., 2020). Ante esta situación, el gobierno nacional se comprometió con la firma del acuerdo de París en reducir las emisiones de estos gases (García Arbeláez et al., 2016). Con el objetivo de tener una visión climática de largo alcance, la estrategia a 2050 provee un gran potencial para el país en ser líder en la región promoviendo una economía resiliente de bajas emisiones y circular, fijando una reducción de los gases de efecto invernadero en un 51% (MinAmbiente, 2021).

Para alcanzar estos objetivos, el mundo ha analizado formas de reducir las emisiones, principalmente del sector energético. El despliegue de tecnologías e innovaciones tecnológicas es una parte importante de la disminución de estas concentraciones, sin embargo, es necesario acelerar su desarrollo. Estos procesos tratan de alcanzar dos objetivos: electrificar la mayor parte posible de la demanda energética y descarbonizar totalmente el suministro de electricidad, empleando sobre todo fuentes renovables o de emisiones neutrales (Serin, 2023). Una de las tecnologías con mayor acogida ha sido la captura, transporte, almacenamiento y uso de dióxido de carbono o CCUS (por sus siglas en inglés *Carbon, Capture, Use and Storage*) empleada en la mitigación de las emisiones de gases de combustión a la atmósfera (Anantharaman et al., 2018; Yáñez Angarita et al., 2022). No obstante, el costo que implica su implementación, actualmente,

hace que sea un camino poco atractivo, debido a que se hacen grandes inversiones, pero no se tienen ingresos monetarios que permitan un balance financiero llamativo para las empresas.

Por lo anterior, la industria energética ha considerado la opción de usar y reciclar el CO₂ como método de recobro mejorado, donde el gas queda almacenado mientras se aumenta la producción de petróleo durante diferentes esquemas de implementación (Godec et al., 2011). Si bien los componentes de la cadena de suministros de los proyectos CCUS han sido estudiados por separado, la integración en un solo sistema no presenta una alta madurez tecnológica (Fleten et al., 2010). En Colombia se requiere desarrollar toda la cadena, desde la captura, el transporte y el uso en los campos del país con el objetivo de implementar un proyecto de CCUS. Aunque la captura e implementación de CO₂ en el país ya ha tenido algunas pruebas piloto, en el campo Llanito y Galán en el Valle Medio del Magdalena (VMM) las cuales obtuvieron buenos resultados, no se pudo llegar a una masificación de la técnica debido a la baja disponibilidad de CO₂ puro en el país (Castro et al., 2010).

En recientes investigaciones, con el objetivo de generar una disminución de las emisiones en la producción nacional, se ha encontrado un gran potencial para retomar y desarrollar la tecnología en el país mediante la separación del CO₂ de los gases de combustión generados en las diferentes industrias. No obstante, es necesario asegurar la fase de transporte con el objetivo de poder llevar a cabo el proyecto, ya que el país no cuenta con una infraestructura para la movilización de este tipo de fluido. La conexión entre fuentes de emisión y puntos de inyección se puede lograr de diferentes maneras y configuraciones, de las cuales algunas pueden resultar más oportunas que otras dependiendo del proyecto (Wellenstein & Slagter, 2011). Mientras que algunos países, como Estados Unidos, llevan varios años liderando el estudio y despliegue de las

diferentes etapas de la cadena de suministro para consolidar estos métodos de descarbonización, países como Colombia deben contemplar inicialmente pilotos de proyectos CCUS.

El transporte en este tipo de proyectos está dominado por el uso de las tuberías, considerando la madurez tecnológica de las redes de la industria de hidrocarburos en el mundo (Becattini et al., 2022; de Coninck et al., 2009; Hong, 2022; Lotz & Brent, 2008; Svensson et al., 2004). Sin embargo, el transporte puede ser extendido a otras tecnologías como el uso de barcos e incluso tanques en camiones y trenes cuando de pequeños volúmenes se trata (Li et al., 2011). Estudios indican que en proyectos iniciales el uso de métodos de transporte que generen flexibilidad en su operación es mejor que la instalación de tuberías con un trazado fijo desde la fuente de emisión hasta los puntos de inyección (Becattini et al., 2022; Motohashi et al., 2011). Ante esta situación, el presente trabajo de investigación permitió realizar la identificación de las mejores rutas para transporte del CO₂ desde la Refinería de Barrancabermeja como zona de emisión hasta el campo a realizar la inyección en sus diferentes pozos. Para esto, fue necesario realizar una revisión de literatura de los métodos de transporte empleados en antecedentes técnicos, lo cual permitió identificar las técnicas requeridas en una posible red de transporte de dióxido de carbono en el VMM como se observa en el capítulo 2. El capítulo 3 contempla la formulación del modelo de optimización teniendo en cuenta las consideraciones del proceso de CCUS y se realizó la validación del modelo mediante la herramienta GAMS. En el capítulo 4 se planteó el algoritmo de solución mediante la metaheurística de la búsqueda tabú. Posteriormente, en el capítulo 5 se evaluó la localización de un punto de almacenamiento del CO₂ y el efecto que este tuvo sobre el proceso de transporte. El aporte esta tesis radica en ser un antecedente que permita tener información para tomar decisiones ante una puesta en marcha de un proyecto piloto de inyección de CO₂, principalmente enfocado en temas de la logística de la operación para el VMM.

Cumplimiento de los objetivos**Tabla 1***Cumplimiento de los objetivos de la tesis de investigación*

Objetivo	Cumplimiento
Revisar los métodos de transporte que se han empleado en la literatura desde el sitio de captación hasta el pozo inyector en procesos de almacenamiento de CO ₂ en formaciones	Capítulo 2
Formular el modelo de optimización para el problema de ruteo de CO ₂ desde el punto de captación a los pozos petroleros en el Valle Medio del Magdalena	Capítulo 3
Desarrollar la técnica de búsqueda Tabú para resolver el modelo de ruteo propuesto empleando el lenguaje de programación Python	Capítulo 4
Examinar los diferentes escenarios posibles en la localización de la estación de almacenamiento del CO ₂	Capítulo 5
Elaborar un artículo publicable con los elementos más relevantes de la investigación	Apéndice 1

1. Generalidades del proyecto

1.1. Planteamiento del problema

El Valle Medio del Magdalena es una zona caracterizada por su importante actividad en la industria petrolera. En esta cuenca se encuentran importantes campos petroleros, facilidades de producción-tratamiento y una de las principales refinerías del país. El complejo es conocido por los altos volúmenes que maneja en su procesamiento de hidrocarburos, los cuales por ende generan una de las más importantes fuentes de emisión de gases de efecto invernadero de esta zona. Ante esta situación y con el objetivo de disminuir los niveles de emisiones de la refinería, surge la necesidad de conocer las opciones disponibles para el transporte del CO₂ desde esta fuente a los puntos de destino en un posible proyecto piloto de CCUS. Dado que los proyectos se encuentran en la fase inicial de ejecución, los costes de la cadena de suministro deben considerarse un factor esencial para garantizar la rentabilidad duradera del proyecto. Por ello, en el caso de VMM, el uso de camiones para el transporte de CO₂ sería la opción más viable para poner en marcha un proyecto piloto. Aunque la capacidad de transporte es baja, este método permitiría flexibilidad en el diseño de las rutas y la adquisición de la flota no representa un coste considerable, ya que puede venderse o utilizarse para otras tareas del proyecto. Según algunos autores, a veces puede ser más ventajoso transportar el CO₂ capturado en pequeños lotes a través de largas distancias hasta un lugar con mejores condiciones de almacenamiento que aprovechar las economías de escala de los gasoductos troncales de gran diámetro (Bielicki, 2009). Es por lo que la presente investigación surge ante la necesidad de establecer las rutas que se contemplaran para el uso del gas el cual será un insumo primordial en las pruebas de recobro mejorado en los campos de la cuenca del Valle Medio del

Magdalena, permitiendo la reducción de su contenido en el ciclo del carbón al ser almacenado durante el proceso.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar posibles soluciones al problema de ruteo de transporte de dióxido de carbono en el Valle Medio del Magdalena

1.2.2. Objetivos Específicos

Revisar los métodos de transporte que se han empleado en la literatura desde el sitio de captación hasta el pozo inyector en procesos de almacenamiento de CO₂ en formaciones

Formular el modelo de optimización para el problema de ruteo de CO₂ desde el punto de captación a los pozos petroleros en el Valle Medio del Magdalena

Desarrollar la técnica de búsqueda Tabú para resolver el modelo de ruteo propuesto empleando el lenguaje de programación Python

Examinar los diferentes escenarios posibles en la localización de la estación de almacenamiento del CO₂

Elaborar un artículo publicable con los elementos más relevantes de la investigación

1.3. Marco Teórico

1.3.1. *Logística*

La logística se ha asociado históricamente a las estrategias necesarias para poder colocar en movimiento diferentes tipos de recursos como lo han sido armas, tropas, insumos y víveres. Al pasar el tiempo, esta dinámica se fue relacionando con el desarrollo comercial de las poblaciones y sus intercambios de bienes y servicios. En la actualidad, la logística puede considerarse el motor de la cadena de suministro de la sociedad, la cual logra satisfacer distintas clases de demanda, desde productos de primera necesidad a algunos tipos de ocio y lujos (Balza Franco et al., 2020).

Garg et al. (2021) plantean que la logística provee el producto o servicio a el consumidor de acuerdo con la demanda y necesidad de este. Su papel es de mucha importancia y puede definirse como el manejo del flujo de recursos entre el productor y el consumidor en orden de satisfacer los requerimientos del cliente. Si bien existen otros autores como Castellanos Ramírez (2009), los cuales optan por regirse por una definición estándar como lo es la establecida por el *Council of Logistic Management* el cual indica que la “logística es el proceso de planear, implementar y controlar efectiva y eficientemente el flujo y almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada del punto de origen al punto de consumo con el propósito de cumplir los requisitos del cliente”.

El transporte de carga ha constituido un pilar importante en la dinámica de las industrias de los países, donde este tipo de transporte de manera tradicional se ha enfocado en la movilización física de la mercancía solicitada considerando las diferencias entre los tamaños de los fletes. El traslado a través de los diferentes mecanismos de transporte puede ser diferenciados conforme la cantidad, la calidad, el tiempo y el costo que conlleva la movilización de la carga (Mora, 2014).

Como se aprecia en la **Tabla 2**, Mora (2014) categoriza de mayor relevancia (A) a menor (D) una serie de variables consideradas para cada uno de los modos de transporte.

Tabla 2

Comparación entre modalidades de transporte de carga

Factor	Férreo	Terrestre	Aéreo	Marítimo
Flexibilidad	C	A	B	D
Acceso	C	A	B	D
Rapidez	B	C	A	D
Seguridad	B	A	C	D
Capacidad	B	B	D	A
Tipos de carga	B	B	D	A

La programación de las entregas y el ruteo del proceso logístico son de gran importancia para las actividades de la cadena de suministros, ya que esto incurre en una gran cantidad de los costos asociadas, así como la satisfacción del cliente. Si bien, esta distribución puede ser afectada por múltiples factores derivados de las demandas de las empresas, clientes y el entorno han hecho que los problemas de distribución sean temas de estudio en investigaciones operacionales como lo es el problema del ruteo de vehículos (Konstantakopoulos et al., 2022).

1.3.2. Ruteo de vehículos

También denominado VRP, por sus siglas en inglés *Vehicle Routing Problem*, es uno de los problemas más comunes en las operaciones logísticas en donde se plantea la búsqueda de soluciones que permitan cumplir con diferentes tipos de restricciones como lo son números de vehículos, capacidades de carga, lugares de destino, demanda de clientes, entre otras consideraciones (Rocha Medina et al., 2011). Braekers et al. (2016) indican que el problema

clásico de VRP tiene como objetivo encontrar una serie de rutas de vehículos con menores costos que permita que cada cliente sea visitado, que las rutas inicien y terminen en el depósito y que la capacidad de los vehículos no se exceda. De igual manera, exponen que este problema se ha expandido permitiendo abarcar los aspectos de la vida real y otras características resultando en una gran variedad de problemas de ruteo de vehículos. Para analizar la eficiencia de los algoritmos es necesario considerar su complejidad, permitiendo conocer mejor el diseño del algoritmo obteniendo una mejor calidad y eficiencia. Cruz Chavez et al. (2014) indican que la complejidad puede ser considerada como la cantidad de recursos necesarios para efectuar el cálculo. Los autores indican que los problemas pueden ser clasificados en tres tipos:

- P: aquellos que se pueden resolver en un tiempo polinómico
- NP: son clasificados como problemas intratables en un tiempo razonable cuando las variables que lo componen son una cantidad grande.
- NP Completos: no pueden ser resueltos en tiempo polinómico y se debe recurrir a un valor próximo a la solución del problema acotando polinomialmente el tiempo.

Existen diferentes tipos de clases o variaciones del VRP y todas estas son catalogadas como problema de tipo NP-completos ocasionando que los métodos de solución exactos presenten dificultad en su solución debido a altos tiempos de cómputo, más cuando los problemas involucran el mundo real ocasionando que los problemas tengan un tamaño considerable (Kumar & Panneerselvam, 2012). Es por esto que el uso de métodos alternativos como los heurísticos, metaheurísticos e híbridos son empleados para la solución de este tipo de problemas.

1.3.3. Métodos metaheurísticos

Vélez y Montoya (2007) indican que los metaheurísticos son aquellos que presentan una búsqueda aproximada y han sido diseñados para dar respuesta a problemas de optimización combinatoria, en los que los convencionales o heurísticos clásicos no presentan una efectividad. Los metaheurísticos permiten tener un marco general para crear nuevos algoritmos de tipo híbridos, realizando una combinación con diferentes conceptos derivados la evolución biológica, los mecanismos estadísticos y de la inteligencia artificial. Entre las ventajas que contempla el uso de metaheurísticos frente a otros métodos se encuentra en su gran flexibilidad, lo que se traduce en su amplia gama de aplicación en la resolución de problemas. Elshaer y Awad (2020) indican que este tipo de métodos representan un importante campo de investigación de los problemas de optimización combinatoria, donde el VRP es uno de los temas con mayor estudio en este tipo de problemas. Como resultados de su investigación encontraron que las principales técnicas empleadas en la resolución de este tipo de problemas son las de búsqueda tabú (TS), búsqueda por vecinos variables (VNS), búsqueda por el vecino más largo (LNS) y recocido simulado (SA) con una participación del 30.1, 22.8, 15.4 y 12.2% de ocurrencia en las investigaciones analizadas.

1.3.4. Búsqueda Tabú

Glover y Melián (2003) exponen que la búsqueda tabú se basa en los métodos diseñados para analizar cotas de factibilidad u optimización con el objetivo de eliminar cotas sistemáticamente con el objetivo de permitir la exploración de regiones que no hayan sido consideradas por otros casos. De igual manera indican que esta técnica permite derivar y explotar estrategias de manera inteligente para la solución de los problemas considerando procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje. La memoria que presenta este método permite que se

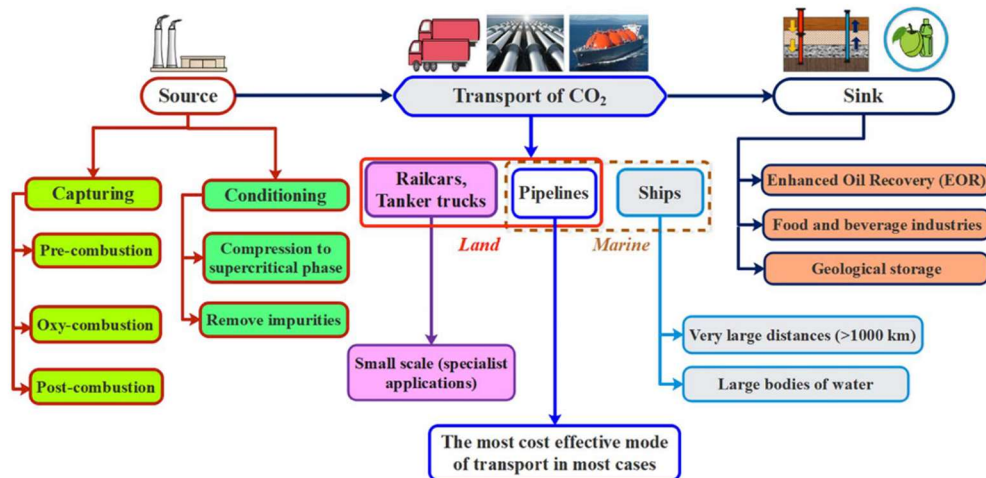
considere la historia del proceso, y de igual manera, exige la creación de estructuras que terminan en la explotación para encontrar las soluciones a la situación. Estos autores establecen que la búsqueda tabú se puede realizar en tres pasos: inicialización, elección-finalización y actualización.

1.3.5. Captura, uso y almacenamiento de carbono

Esta tecnología es considerada crítica en la reducción de dióxido de carbono, la cual permite una mitigación en las emisiones realizadas a la atmósfera. Este proceso también denominado CCUS por sus siglas en inglés *Carbon, Capture, Use and Storage*, contempla principalmente tres escenarios los cuales son captura, transporte y almacenamiento o uso. La cadena de suministro que presenta la recolección de este gas hasta su destino final se puede apreciarse en la **Figura 1**.

Figura 1

Cadena de suministro de CO2 en un proceso CCUS.

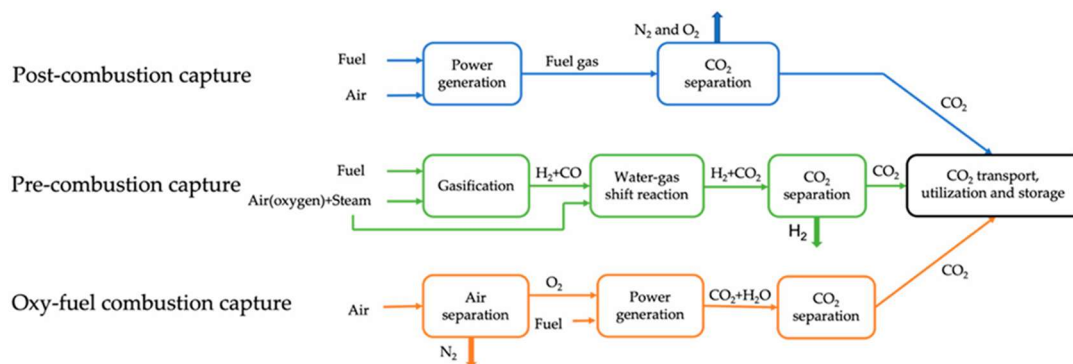


Tomado de: Sleiti et al. (2022) Carbon Dioxide Transport Pipeline Systems: Overview of Technical Characteristics, Safety, Integrity and Cost, and Potential Application of Digital Twin.

La primera etapa consiste en la captura y acondicionamiento del efluente de interés en las diferentes fuentes de emisión. La **Figura 2** muestra las tres principales maneras de poder hacer la captura del CO₂ en la fuente, de las cuales la post combustión es aquella que presenta una mayor acogida por su versatilidad en la adaptación a las fuentes de emisión. Este método es una tecnología madura, sin embargo, requiere un alto consumo de energía y no se obtiene una buena pureza ya que su efluente este compuesto en igual medida de N₂. En cuanto a la captura en precombustión se alcanza una buena pureza del gas, sin embargo, los costos de inversión para su puesta en marcha son altos y esta tecnología presenta limitaciones en su aplicación. Por último, la captura por oxy-combustión, aunque es una técnica simple y se obtienen buenas concentraciones y purezas en el efluente, es necesario tener un equipo adicional el cual representa altos consumos e inversión.

Figura 2

Métodos para la captura de CO₂.



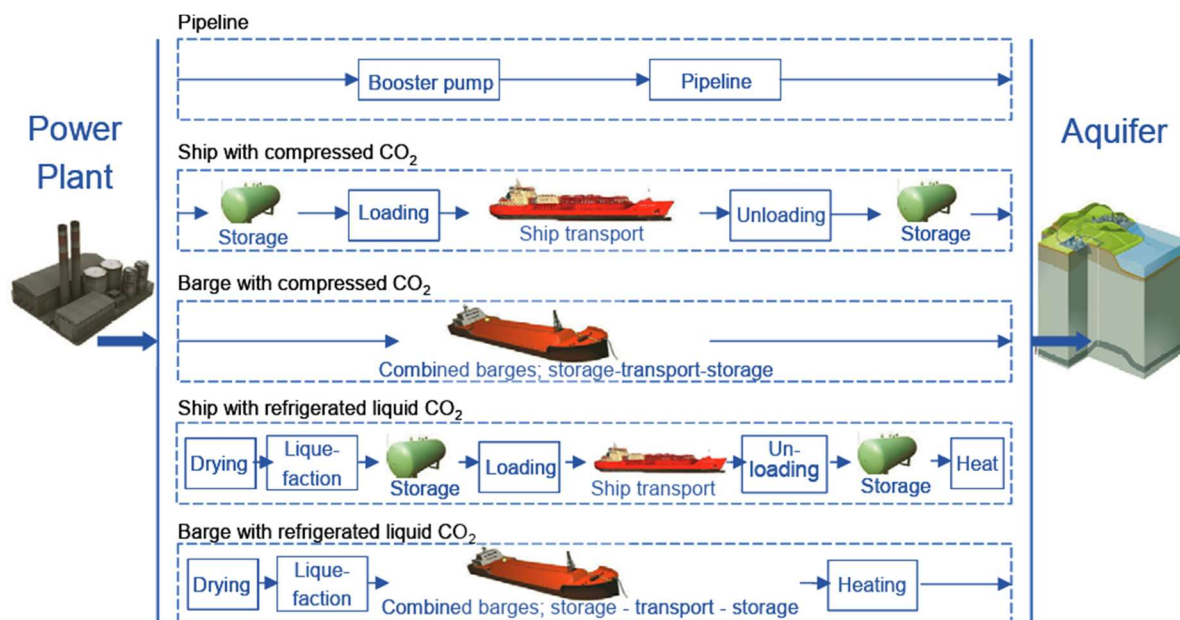
Tomado de: Yao et al. (2023) A Review of Recent Progress of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in China.

La etapa del transporte está dividida principalmente en dos escenarios, el uso de tuberías, carros y trenes en locaciones costa adentro, y el uso de diferentes tipos de barcos y tuberías submarinas costa afuera. En la **Figura 3** se observan las posibilidades que puede tener un proyecto

de CCS al momento de realizar el desplazamiento de este gas desde una fuente como lo es una planta de energía hasta un sitio de almacenamiento como lo es un acuífero.

Figura 3

Métodos de transporte de CO₂.



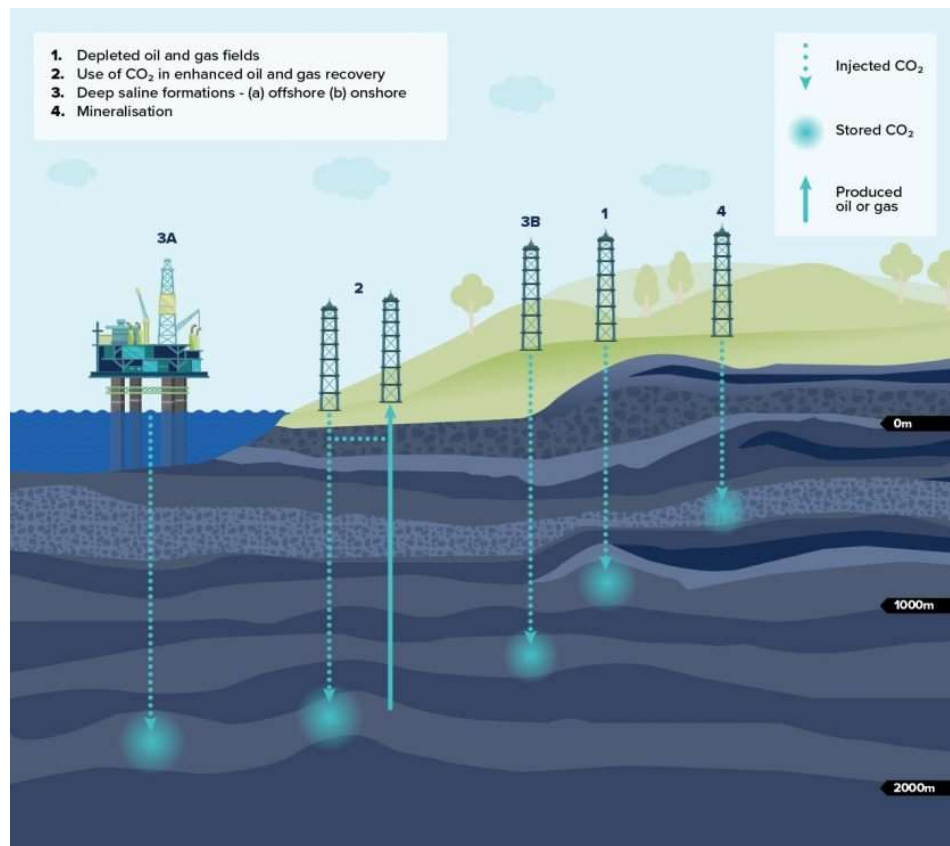
Tomado de: Haugen et al. (2009) Options for transporting CO₂ from coal fired power plants Case Denmark.

Por último, se encuentra la disposición final del CO₂, el cual se puede dividir en dos partes principales proyectos enfocados en el uso de este gas en procesos adicionales para poder generar un valor a la actividad, o proyectos que solo buscan hacer el depósito del efluente en formaciones subterráneas. Dentro de los usos que se pueden dar al CO₂ se encuentran la oportunidad de emplearlo en el recobro mejorado de hidrocarburos, en la producción de gas, la implementación en mantos de carbón, el recobro de agua y la transformación a biocombustibles líquidos entre otras aplicaciones (Jiang & Ashworth, 2021). Para el almacenamiento del CO₂ se debe considerar las propiedades geológicas de la formación resaltando la porosidad, la permeabilidad y la

permanencia. La primera está asociada al tamaño de los poros, los cuales deben ser de tamaños de milímetros que permitan el almacenamiento en sus cavidades. En cuanto a la permeabilidad, se debe asegurar que la conexión entre poros sea suficiente que permita que el CO₂ pueda fluir a través de la formación a la tasa de inyección fijada en el plan de operaciones. Por último, la permanencia se encuentra relacionada con que la formación cuente con una capa sello que permita actuar como barrera y ayude a que el gas se encuentre almacenado sin fugas. La **Figura 4** muestra los principales escenarios empleados en el almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas (1, 3A, 3B, 4) y el uso en procesos de recuperación de crudo y gas (2).

Figura 4

Principales opciones para el almacenamiento de CO₂.



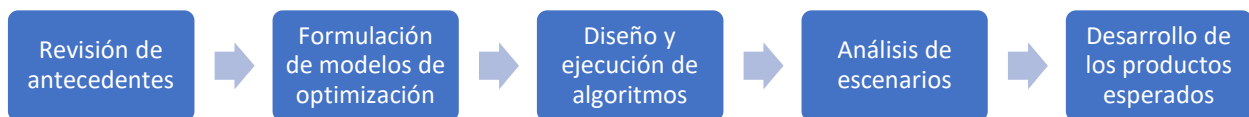
Tomado de: Global CCS Institute (2023) Understanding CCS Storage.

1.4. Metodología de la investigación

Para el desarrollo del trabajo de grado se propuso un flujo de trabajo, el cual se encuentra plasmado en la **Figura 5**. Estas fases fueron planteadas considerando la consecución del cumplimiento de los objetivos específicos planteados para el trabajo de investigación.

Figura 5

Flujo de trabajo propuesto para el desarrollo del trabajo de grado



1.4.1. *Revisión de antecedentes*

Con el objetivo de poder conocer los métodos de transporte que han sido empleados a lo largo de los años para la movilización del CO₂ en el mundo, principalmente en proyectos de CCUS, se planteó una revisión de antecedentes a través de una metodología estructurada como lo es PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). De igual manera, esta fase tuvo como objetivo el poder identificar antecedentes de modelos de optimización en el transporte de dióxido de carbono y las técnicas empleadas en la resolución de estos modelos.

1.4.2. *Formulación de modelos de optimización*

Al contar con la información suministrada por la revisión bibliográfica, se procedió a realizar la formulación del modelo de optimización a emplear en el lenguaje de programación libre Python, identificando los datos característicos del caso de estudio, los parámetros a emplear, las variables a encontrar y las restricciones que se requieren para poder realizar el problema de ruteo

en el contexto del transporte de CO₂. Para poder validar el modelo generado, se empleó la herramienta GAMS con licencia académica del Grupo de Investigación OPALO.

1.4.3. Diseño y ejecución de algoritmos

Al contar con el modelo validado, se procedió a realizar el diseño del algoritmo de la metaheurística Búsqueda Tabú en Python con el objetivo de poder encontrar una solución factible al problema de ruteo en estudio. Posterior a su construcción, se realizó la ejecución y evaluación de las mejores rutas encontradas a través del algoritmo mediante distintos escenarios planteados a lo largo del Capítulo 4.

1.4.4. Análisis de escenarios

Con el objetivo de poder evaluar los procesos de transporte de dióxido de carbono en el Valle Medio del Magdalena, se planteó un análisis de dos escenarios posibles en el cual el punto de almacenamiento del gas era diferente. En primera instancia se planteó que el punto de emisión del gas era el mismo punto de almacenamiento de este, sin embargo, se optó por un segundo escenario en el cual el punto de almacenamiento del gas se encontrara en el activo petrolero en estudio. Esto permitió analizar la factibilidad en tiempos de operación para la realización del proceso del transporte del gas. La localización de este nuevo punto fue realizada mediante un problema simple de localización de facilidades empleando Python para su solución.

1.4.5. Desarrollo de productos esperados

Por último, se desarrollarían los productos del presente trabajo de investigación en el cual se espera poder recopilar la información encontrada a través de un documento técnico y un artículo de investigación con el objetivo de divulgar académicamente el proyecto realizado.

2. Revisión de literatura

2.1. Análisis bibliométrico

El transporte de CO₂ en el mundo no es una tecnología nueva que solo ha sido implementada en los últimos años, ya que este proceso ha sido empleado en diferentes procesos como lo es el uso de este gas para tener una mejora en la producción de crudos empleando técnicas de recobro mejorado con CO₂ en la industria de los hidrocarburos. Sin embargo, con el auge de los proyectos de *Carbon, Capture and Storage* (CCS) y CCUS el transporte de este gas se ha expandido a otras industrias y países que no presentaban facilidades instaladas para su manejo. Si bien, aunque Colombia ha desarrollado pilotos de inyección de dióxido de carbono en algunos de sus activos petroleros, el país no tiene una red de distribución de CO₂ definida desde las fuentes de emisión hasta los posibles sitios de uso y almacenamiento como lo son los campos petroleros. Ante la necesidad de conocer los métodos disponibles para el transporte de este gas y las experiencias que han presentado los antecedentes en la decisión de su aplicación, se planteó una revisión de literatura empleando unas ecuaciones de búsqueda en tres diferentes bases de datos como se resume en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Ecuaciones de búsqueda empleadas en las bases de datos

Base de datos	Ecuación de búsqueda
Scopus	ABS ((CO ₂ OR "carbon dioxide") AND (transportation OR shipping) AND (CCS OR "carbon capture" OR "carbon storage" OR "CO ₂ injection")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))
Web of Science	(CO ₂ OR "carbon dioxide") AND (transportation OR shipping) AND (CCS OR "carbon capture" OR "carbon storage" OR "CO ₂ injection") Refined by: Document type-Article or Review Article; Language: English

EBCOHost	(CO2 OR "carbon dioxide") AND (transportation OR shipping) AND (CCS OR "carbon capture" OR "carbon storage" OR "CO2 injection")
----------	---

El presente trabajo de investigación implementó una revisión de literatura estructurada basada en la metodología PRISMA empleada en revisiones sistemáticas. La **Tabla 4** recopila la información encontrada con las ecuaciones de búsqueda en las bases de datos consultadas y la **Figura 6** permite observar la distribución de esta información a través de los años. Como resultado fue posible encontrar una tendencia en aumento de la cantidad de documentos obtenidos a través de los años, lo que indica que la temática de estudio es de interés para la comunidad en la actualidad.

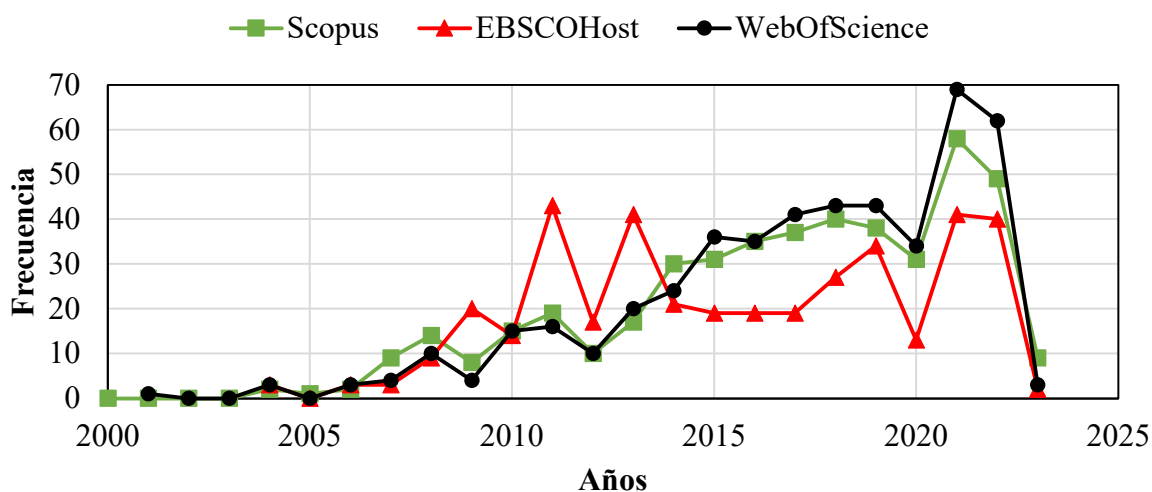
Tabla 4

Documentos encontrados con las ecuaciones de búsqueda

Base de datos	Cantidad de documentos	Más antiguo	Más nuevo
Scopus	458	1927	2023
Web of Science	476	2001	2023
EBCOHost	388	2004	2023

Figura 6

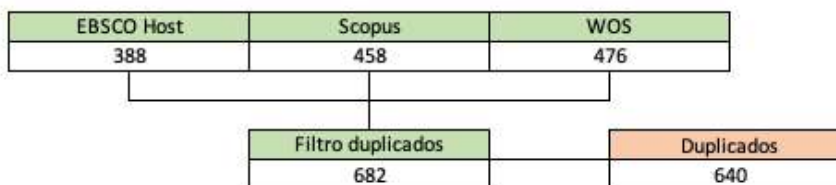
Comportamiento de datos encontrados a través de los años



La metodología PRISMA consta de dos pasos principales: depuración de documentos duplicados, y depuración con título-resumen considerando unos criterios de inclusión y exclusión. Una vez fueron obtenidos los documentos, se procedió a realizar el primer filtro el cual fue la remoción de duplicados que hayan sido encontrados en las tres bases de datos. En la **Figura 7** se observa que de una cantidad inicial de 1322 artículos fueron depurados 640 documentos duplicados, obteniendo 682 artículos con los cuales iniciar la revisión de literatura.

Figura 7

Proceso de depuración de documentos duplicados



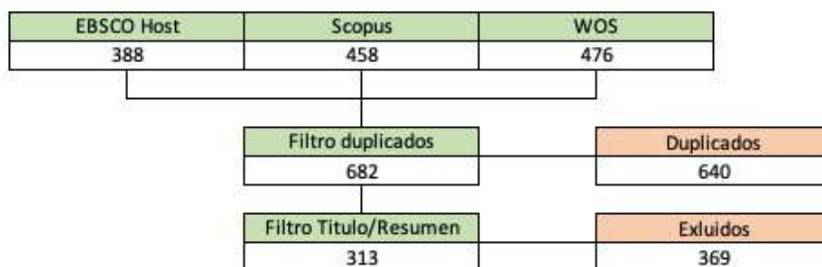
El siguiente paso fue la depuración de los documentos realizando un filtro por título y resúmenes de las investigaciones. Este paso permitió identificar aquellos documentos que, aunque presentaron las palabras claves dispuestas en las ecuaciones de búsqueda, no se alinean con el objetivo de la revisión de literatura que se deseaba realizar. La **Figura 8** recopila la información de esta etapa, con 313 documentos asociados al transporte de CO₂ sin importar su disposición final, ya sea almacenamiento o uso en algún proceso industrial posterior.

Con estos documentos se inició el proceso de análisis bibliométrico, el cual fue considerado empleando palabras claves, revista de publicación y país de afiliación. Iniciando con el análisis de las palabras claves, en la **Figura 9** se puede apreciar el diagrama de coocurrencia encontrado empleando el software libre VOSviewer. Como resultado, se puede observar la generación de 5

clústeres principales conforme las palabras claves empleadas por los autores en sus investigaciones.

Figura 8

Proceso de depuración conforme el título y resúmenes



Analizando de izquierda a derecha, el primer clúster de color azul se encuentra relacionado principalmente con los estudios enfocados en el uso de tuberías para el transporte del dióxido de carbono y las palabras relacionadas como costos, transporte, infraestructura, captura y almacenamiento. Como segundo clúster se puede encontrar el representado por color verde, el cual se agrupan las palabras claves relacionadas a los procesos de recobro mejorado, donde pueden identificarse asociaciones con inyección de CO₂, captura de carbono, almacenamiento y secuestro de carbono. Como tercer clúster representado por el color amarillo, en la parte superior central se puede observar de palabras claves relacionadas con el transporte de CO₂ empleando buques, donde se pueden asociar los transportadores, el gas licuado (LNG), el proceso de licuefacción y las impurezas del CO₂. Como cuarto clúster identificado por color morado, se puede relacionar con el anterior, ya que presentan similitudes en sus palabras asociadas y la diferencia radica en el uso de las facilidades de gas natural presentes para el transporte y manejo del CO₂. Por último, el clúster central representado por el color rojo se encuentra relacionado a las generalidades del proceso de captura y almacenamiento de carbono, así como de los estudios que han enfocado su proceso en la corrosión, el análisis del comportamiento del proceso bajo impurezas y la dispersión en el

ambiente cuando se presentan fugas de este. En cuanto a la red con nodo en optimización, perteneciente al primer clúster, se puede observar que este se encuentra interrelacionado con los otros indicando que algunas investigaciones han analizado la optimización de sus procesos.

Figura 9

Diagrama de co-ocurrencia de palabras claves encontradas en los artículos

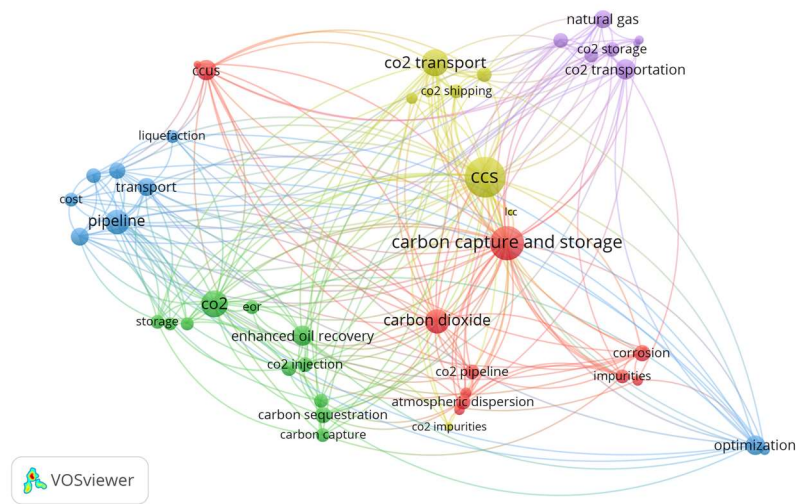
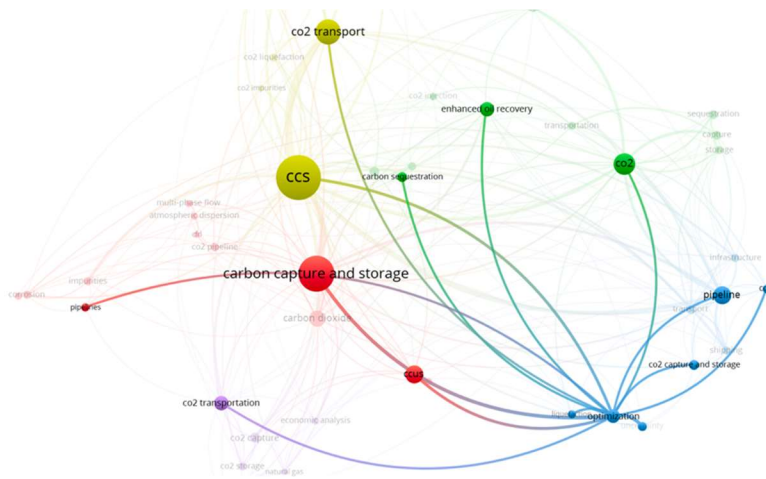


Figura 10

Diagrama de co-ocurrencia de palabras claves relacionadas con optimización



En cuanto a las revistas donde se generaron las publicaciones, la **Figura 11** muestra aquellas que presentaron más de dos publicaciones en los resultados encontrados. Como se observa, los artículos fueron publicados principalmente en las revistas International Journal of Greenhouser Gas Control (ElSevier), Energy Procedia (ElSevier), Applied Energy (ElSevier) y Energies (MDPI) contando con más de 10 artículos en estas revistas. En cuanto a la casa editorial, se puede apreciar que ElSevier es quien contiene un aproximado del 75 % de los artículos analizados, seguido por MDPI y Springer con un 5% de participación observado en la **Figura 12**.

Figura 11

Frecuencia de publicación de los artículos analizados en revistas académicas

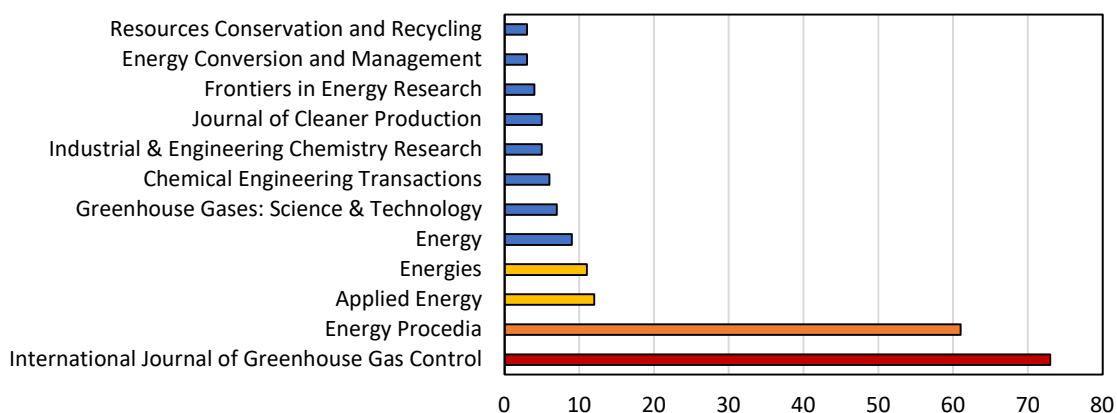
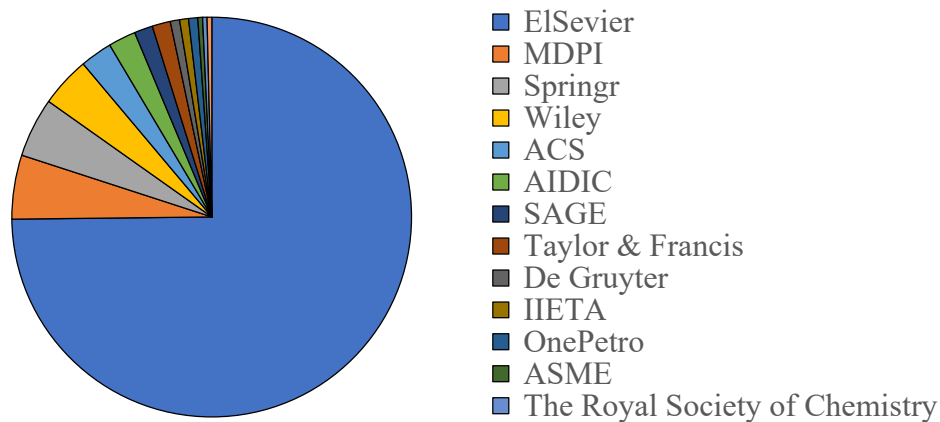


Figura 12

Frecuencia de las casas editoriales encontrados en los artículos



2.2. Análisis preliminar de la literatura

El dióxido de carbono es un gas inoloro e incoloro, el cual se compone por una molécula de carbono y dos de oxígeno y se encuentra catalogado como un gas que aporta al efecto invernadero del planeta tierra. Este gas es emitido por diferentes industrias, medios de transporte y de manera natural por seres que habitamos el planeta. Si bien, este gas hace parte del ciclo del carbono, el incremento en la producción de este gas en los últimos años ha generado que este ciclo pierda un poco su balance por la cantidad de gas antropogénico que ha ingresado al proceso. Es por esto que con el objetivo de mitigar las emisiones de estos gases, los métodos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) han sido incorporado. Estos procesos han sido catalogados como una tecnología crítica para la mitigación climática y se espera que permitan reducir en un 32% las emisiones hacia el año 2050 (Jiang & Ashworth, 2021).

El inicio de estos proyectos contemplaba un sistema punto a punto, donde se conocía la fuente de emisión y el gas era transportado a un punto fijo. Sin embargo, en la actualidad se contempla el uso de centros o clústeres para poder realizar una unión de diferentes corrientes de dióxido de carbono las cuales han sido capturadas en diversas fuentes de emisión (Becattini et al., 2022). Esto genera que exista una necesidad de conocer las mejores opciones disponibles para la distribución logística de este gas conforme las tecnologías actuales lo permitan. Lu et al., (2020) presentan los principales medios de transporte existentes para realizar la logística de dióxido de carbono desde las fuentes de emisión hasta sus lugares de uso o almacenamiento. Los autores contemplan cuatro medios de transporte principales que son el uso de tuberías, el sistema ferroviario, los camiones y barcos. En la **Tabla 5** se aprecian las ventajas y desventajas que presentan estos medios de transporte para el manejo del dióxido de carbono.

Tabla 5*Ventajas y desventajas de los medios de transporte*

Medio de transporte	Ventajas	Desventajas
Tubería	El volumen de transporte es grande y su costo es bajo	La inversión inicial de las facilidades de tuberías es alta
Ferrovionario	No se encuentra afectado por el tráfico ni el tiempo No se requieren facilidades especiales para su transporte	Los requerimientos de en el punto de inicio y destino del gas son altos, así como la necesidad de que estos queden cerca de las vías férreas
Camión	No tiene limitaciones en las fuentes y destinos No se requiere de una inversión en la construcción de facilidades de transporte	Los costos de transporte son altos Son susceptibles a los cambios del tiempo y del tráfico Costos de operación y combustible son altos
Barco	Económicos y cuentan con el respaldo de una tecnología de transporte madura que lo respalda	Los requisitos de control de presión y temperatura del equipo de transporte son altos

Lazic et al. (2014) indican que el uso de tuberías es la forma más factible de transporte de dióxido de carbono, al tratarse de los largos volúmenes a movilizar por grandes distancias. Su funcionamiento es similar al transporte de hidrocarburos mediante ductos, sin embargo, su operación es más complicada debido a las propiedades termodinámicas no lineales que presenta y la necesidad de transportarlo a presiones sobre el punto crítico en fase densa. No obstante, su aplicación se encuentra bien documentada principalmente en Estados Unidos, donde existe una red de distribución bastante amplia contando con alrededor de 2.500 km de ductos que permiten el movimiento de alrededor 100.000 toneladas por día en el interior del país, así como hacia Canadá en proyectos de CCUS (Luhning et al., 2005).

Si bien la infraestructura para el transporte de dióxido de carbono en Estados Unidos se encuentra bien establecida, en el resto del mundo no existen redes de distribución dedicadas a este gas lo que requeriría de una alta inversión inicial. Por lo anterior, el transporte por barco surge como una solución importante a considerar en las etapas iniciales, debido a su flexibilidad en la oferta de rutas entre los sitios costa afuera y los puertos de carga (Zahid et al., 2015b). De igual manera, este medio de transporte es considerado cuando la topografía de la zona es bastante accidentada. Svensson et al. (2004) indica que el trazado de los ductos por terreno montañoso puede representar un aumento del 50% de los costos a comparación con una planicie con menores accidentes geográficos en ella. Por lo tanto en los países nórdicos, la opción de implementar barcos ha sido ampliamente aceptada, ya que su particular geología impide en gran medida el trazado de líneas de ductos a lo largo de su extensión. Kjärstad et al. (2016) en su estudio encontraron que el uso de buques resultó ser la opción menos costosa en comparación con el empleo de ductos para el transporte de dióxido de carbono a su destino final.

En cuanto al uso de vías férreas y camiones para la logística de transporte, estos han sido considerados en escenarios donde los volúmenes a transportar son bajos, el tramo de recorrido es corto o la comunidad presenta una percepción poco amigable con la implementación de métodos como lo son el uso de ductos cercanos a sus viviendas y centros poblados. Algunos estudios han determinado el uso de estas dos propuestas de transporte en escenarios muy específicos, los cuales se caracterizan por bajos volúmenes requeridos a movilizar o en etapas tempranas en su implementación (Becattini et al., 2022; Motohashi et al., 2011).

Si bien la revisión estructurada de la literatura mediante la metodología PRISMA permitió obtener 313 documentos, los cuales representan investigaciones que se encuentran enfocadas en el transporte de CO₂ sin importar su punto de disposición final, ya sea almacenamiento o uso en

algún proceso industrial posterior, estos estudios se han enfocado principalmente en la revisión del comportamiento del dióxido de carbono bajo escenarios de transporte analizado desde un punto de vista termodinámico (Cao et al., 2021; Hammer et al., 2021; Herzog & Egbers, 2013; Joshi et al., 2016; Liu et al., 2017; Lopes et al., 2018; Lyons et al., 2019; Marine Technology Society et al., s. f.; Mazzoldi et al., 2008; Munkejord et al., 2021; Oglund-Hand et al., 2022; Raimondi, 2022; Roussanaly et al., 2021; Shahirpour et al., 2013; Teng et al., 2021; Vitali et al., 2022; Wilkes et al., 2021; Zheng et al., 2017), en consideraciones técnicas de construcción de las facilidades para su transporte (Al Baroudi et al., 2022; Bjerketvedt et al., 2020; Gong et al., 2022; Ma et al., 2021; Mechleri et al., 2017; Mohammadi et al., 2019; Ozaki et al., 2013; Wang et al., 2016; Xing et al., 2021; Yoo, Choi, Kim, et al., 2013; Zahid et al., 2015a, 2017), o enfocados en las regulaciones requeridas para su implementación (Gallo et al., 2021; Gola & Noussia, 2022; Heffron et al., 2018a, 2018b; Tsimplis & Noussia, 2022; Weber, 2021; Weber & Tsimplis, 2017).

Pocos estudios han evaluado las posibles alternativas en el trazado de rutas de transporte para este tipo de gas en casos de estudios. En el caso de un escenario costa dentro también denominado *onshore* en inglés, las posibilidades para la realización del transporte se centran en uso de ductos, tren y camiones, sin embargo, las investigaciones se han centrado en la comparación del tipo de redes de tuberías que se pueden desarrollar en la zona (Grant et al., 2018; Knoope et al., 2015; Roussanaly, Jakobsen, et al., 2013). En cuanto a un escenario costa afuera u *offshore* en inglés, las posibilidades se dividen en dos grandes escenarios, el uso de una tubería submarina o la aplicación de un transporte marítimo dependiendo las condiciones que se tienen en las facilidades de compresión y licuefacción en la costa (Jung et al., 2013a, 2013b; Nogueira et al., 2022; Yoo, Choi, Huh, et al., 2013). Algunos estudios han analizado escenarios, los cuales han representado dos trayectos, uno terrestre y el otro marítimo como lo ha sido el caso de las

investigaciones realizadas por Haugen et al. (2009); Roussanaly et al. (2014); Roussanaly, Hognes, et al. (2013).

Revisada la literatura, se observa que no hay un amplio material disponible en cuanto a la aplicación de técnicas de optimización para resolver los problemas de transporte en el ruteo de gases de dióxido de carbono. Sin embargo, considerando que esta temática es importante para el presente trabajo de investigación, se recurrió a considerar un trabajo desarrollado por Eksioglu et al. (2009) en donde se dispone de una taxonomía enfocada para el problema de ruteo de vehículo. Con esta información se logró delimitar el problema de ruteo que se va a llevar a cabo considerando el tipo de estudio, las características del escenario, las características del problema físico y la información adicional de las características a considerar en el modelo en un problema de ruteo de vehículo con capacidad homogénea o CVRP (por sus siglas en inglés *Capacitated Vehicle Routing Problem*).

La resolución de este tipo de problemas mediante métodos metaheurísticos es acorde a lo que reporta la literatura, como lo indica el estudio realizado por Elshaer & Awad, (2020). Su investigación responde a una revisión estructurada con el objetivo de poder revisar la clasificación de las variantes del problema de ruteo de vehículos resultas por algoritmos metaheurísticos y a su vez investigar la contribución de cada algoritmo en la solución de los problemas de ruteo. Como resultado los autores encontraron que la búsqueda tabú es la técnica de métodos metaheurísticos que ha sido mayormente empleada en la solución de este tipo de procesos y sus variantes, con una participación del 30.1% de los métodos empleados en todas las investigaciones revisadas.

2.3. Marco de antecedentes

A continuación, se presentan tres antecedentes que han sido considerados importantes para la presente investigación. Estos documentos exponen estudios de selección de métodos de transporte de dióxido de carbono, considerando diferentes escenarios y método de selección de los problemas planteados en los procesos.

El artículo de investigación *Transportation systems for CO₂ - Application to carbon capture and storage* publicado en la revista *Energy Conversion and Management* por Svensson et al. (2004) asociados a la Chalmers University of Technology y Vattenfall en el Reino de Suecia. Su trabajo se basó en identificar y analizar diferentes escenarios de transporte, respecto a costos, distancia y tipos de transporte para el manejo de dióxido de carbono con el objetivo de almacenarlo en sitios alejados de sus fuentes de emisión. En su análisis contemplan tres tipos de transporte principales: tuberías y trenes para el manejo en tierra firme, y tuberías y buques para el manejo en un escenario costa afuera. Como conclusión, sugieren que considerando los costos asociados a la logística del transporte las opciones viables son el uso de tuberías, buques o una combinación de estos dos.

El artículo de investigación *Engineering consideration of surface facilities for a candidate CCS demonstration project in Japan* publicado en la revista *Energy Procedia* por Motohashi et al., (2011) asociados a Japan CCS Co y Chiyoda Corporation del Estado del Japón. En este estudio consideraron dos formas para transportar el dióxido de carbono capturado de plantas de procesamiento de gas natural hasta un pozo inyector ubicado en la costa del Mar de Japón. La selección se basó conforme en unos criterios de evaluación como lo fueron el tiempo de construcción, el consentimiento de la población, los costos de construcción-operación y el consumo energético. De su estudio lograron concluir que el método de transporte de CO₂ más

adecuado para el caso de estudio fue el uso de camiones. Esto considerando que el tiempo de construcción y su costo es menor, aun cuando el costo de operación del camión es ligeramente superior al de la tubería en el periodo de tiempo que consideraron el cual fue 5 años. Sin embargo, el consentimiento de los habitantes en cuanto a la construcción de una tubería para CO₂ no es muy claro debido a que no existen precedentes en el país, mientras el uso de camiones ya ha sido aceptado por la comunidad en las plantas de gas cercanas.

El artículo de investigación *Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout* publicado en la revista *International Journal of Greenhouse Gas Control* por Becattini et al. (2022) asociados al Institute of Energy and Process Engineering de Suiza y la McGill University de Canadá. Su trabajo se basó en el análisis de diferentes escenarios de transporte con el objetivo de descarbonizar el sector de *waste to energy* suizo, con puntos de almacenamiento en el Mar del Norte y uno hipotético en su territorio. Las opciones de transporte que contemplaron fue el uso de tuberías, buques, barcazas, trenes y camiones. El problema de optimización fue formulado como un programa lineal mixto (MILP) cuya función fue planteada para un diseño de costo y tiempo optimo en una cadena de abastecimiento multimodal con el objetivo de reducir emisiones. Como resultados encontraron que las tuberías son los métodos más costo-efectivos de transporte considerando una necesidad de movilizar grandes volúmenes de CO₂. En cuanto a los buques o barcazas presentan una posibilidad de competir con las tuberías. Sin embargo, el transporte por trenes o camiones son viables cuando se tienen un horizonte de planeación corto o cuando el volumen a transportar es pequeño.

3. Modelo del problema de ruteo de vehículos

De acuerdo con los parámetros encontrados en la revisión de literatura relacionada con un proceso de transporte de CO₂ en un campo petrolero con el objetivo de abordar un proyecto CCUS, a continuación, en la **Tabla 6** se describe las características del modelo de transporte y posteriormente se plasma el proceso de la formulación para poder dar solución al problema de ruteo de vehículos del caso de estudio.

Tabla 6

Características del modelo CVRP en estudio

Criterio	Consideración
Depósitos	Refinería de Barrancabermeja
Lugar de servicio	Mixto
Alcance del problema	Transporte diario del CO ₂
Origen y destino	Son el mismo, salen y llegan a la refinería
Carga	Única, el dióxido de carbono
Paradas	La localización de los pozos inyectores seleccionados
Objetivo	Minimizar el tiempo de distribución del CO ₂
Restricciones	Capacidad del vehículo

3.1. Formulación del modelo de ruteo

A continuación, se presenta el planteamiento del modelo en una notación matemática conforme las condiciones reportadas anteriormente.

3.1.1. Índices

$i, j = \text{Nodos}$

3.1.2. Conjuntos

- π Pozos y depósitos
- W Pozos por inyectar CO₂
- D Depósito de CO₂

3.1.3. Parámetros

- C_k Capacidad del vehículo
- Q_{wi} Demanda de CO₂ para inyectar en el pozo
- D_{ij} Distancia entre i y j
- P_{ti} Velocidad de carga de CO₂ en el depósito
- P_{tj} Velocidad de descarga de CO₂ en el pozo
- S_k Velocidad del vehículo

3.1.4. Variables de decisión

- X_{ij}^k $\begin{cases} 1 \text{ si } k \text{ viaja de } i \text{ a } j \\ 0 \text{ si } k \text{ no viaja.} \end{cases}$
- f_{ij} Cantidad de CO₂ de i a j

3.1.5. Función objetivo

$$\min \sum_{i \in \pi} \sum_{j \in \pi} (D_{ij}/S_k) * X_{ij} + \sum_{j \in W} \frac{Q_{wi}}{P_{ti} + P_{tj}}$$

Ec. 1

3.1.6. Restricciones

$$\sum_j X_{ij} = 1; \forall i \in W \quad \text{Ec. 2}$$

$$\sum_i X_{ij} = 1; \forall j \in W \quad \text{Ec. 3}$$

$$\sum_j f_{ji} - \sum_j f_{ij} = Q_{wi}, \forall i \in W \quad \text{Ec. 4}$$

$$0 \leq f_{ij} \leq C * X_{ij}, \forall i \neq j \quad \text{Ec. 5}$$

$$\sum_j X_{ij} \geq \frac{\sum_j Q_j}{C}, \forall i \in \pi \quad \text{Ec. 6}$$

$$\sum_i X_{ij} \geq \frac{\sum_j Q_j}{C}, \forall j \in \pi \quad \text{Ec. 7}$$

3.1.7. Explicación del modelo

El modelo planteado busca encontrar las rutas que contemplen el menor tiempo de transporte en problema de estudio. La Ec. 1 presenta la función objetivo del modelo, la cual establece una minimización de los tiempos de transporte, considerando las distancias entre los nodos y la velocidad del vehículo. De igual manera, agrega el tiempo requerido para poder cargar y descargar la cantidad de CO₂ a inyectar en el depósito y pozo inyector respectivamente. La Ec. 2 y Ec. 3 representan las restricciones de llegada y salida del nodo, estableciendo que solo puede ser visitado una sola vez el nodo, a excepción del depósito. La Ec. 4 presenta la restricción que asegura cumplir con la demanda de CO₂ a inyectar en cada nodo. La Ec. 5 establece la capacidad del transporte entre nodos, indicando que debe ser una cantidad positiva pero que no exceda la capacidad del transporte. Y por último se establecen las Ec. 6 y Ec. 7 en donde se indican que las rutas que entran y salen del depósito deben ser mayores o iguales a la cantidad encontrada de dividir la demanda del gas por la capacidad del vehículo a emplear.

3.2. Validación con herramienta de optimización GAMS

Con el objetivo de poder contar con un modelo base que permitiese validar el algoritmo generado en el lenguaje Python, se procedió a realizar en la herramienta GAMS el modelo y poder obtener los valores respectivos de un modelo base, el cual se plantea en Tabla 7 y Tabla 8. Entre los valores escalares considerados en el modelo se tomó una velocidad promedio del vehículo de 30 km/h y una capacidad de transporte variable de 10, 20 y 40 toneladas de capacidad.

Tabla 7

Localización de los puntos de validación del modelo

Nodo	X	Y	Demanda [Ton]
1	-73.83	7.16	-
2	-73.82204	7.124514	4
3	-73.82832	7.158074	5
4	-73.828	7.168219	3
5	-73.834	7.184215	5
6	-73.84001	7.151154	5
7	-73.82724	7.16991	4
8	-73.81457	7.186711	3
9	-73.82596	7.186148	3
10	-73.81222	7.175533	4

Tabla 8

Matriz de distancias de los puntos de validación del modelo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	36	3	8	25	13	10	31	26	24
2	36	0	34	44	61	32	46	63	62	52
3	3	34	0	10	27	14	12	32	28	24
4	8	44	10	0	17	21	2	23	18	17
5	25	61	27	17	0	34	16	20	8	23
6	13	32	14	21	34	0	23	44	38	37
7	10	46	12	2	16	23	0	21	16	16
8	31	63	32	23	20	44	21	0	11	11
9	26	62	28	18	8	38	16	11	0	17
10	24	52	24	17	23	37	16	11	17	0

Las rutas obtenidas para el modelo son las presentadas en la **Figura 14**, **Figura 15** y **Figura 16**. En la **Tabla 9** se muestran las rutas generadas en cada caso, así como el tiempo obtenido para el proceso. Si bien, se observa que la cantidad de rutas aumenta conforme la capacidad del vehículo disminuye, la variación generada en los tiempos también presenta un incremento en el proceso.

Figura 14

Rutas encontradas para el problema de validación con capacidad de 10 toneladas

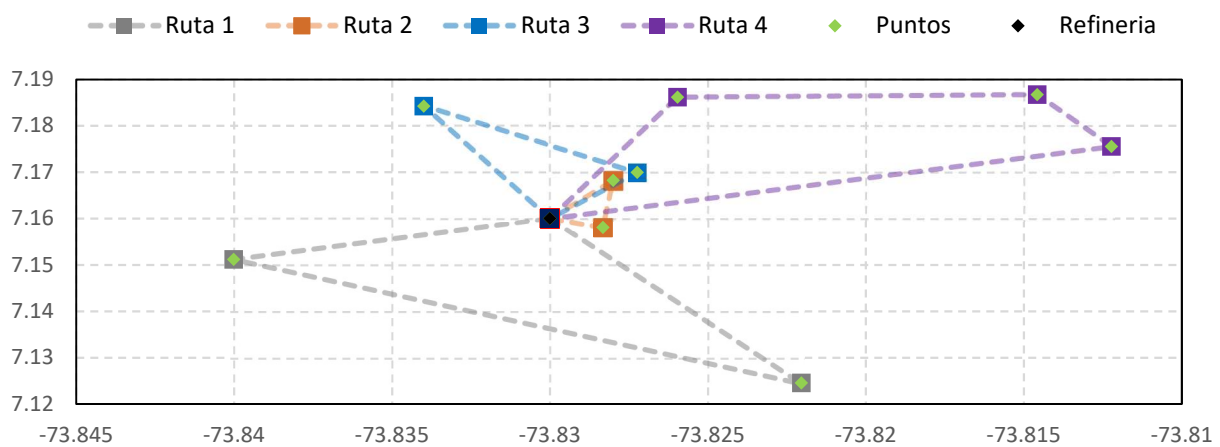


Figura 15

Rutas encontradas para el problema de validación con capacidad de 20 toneladas

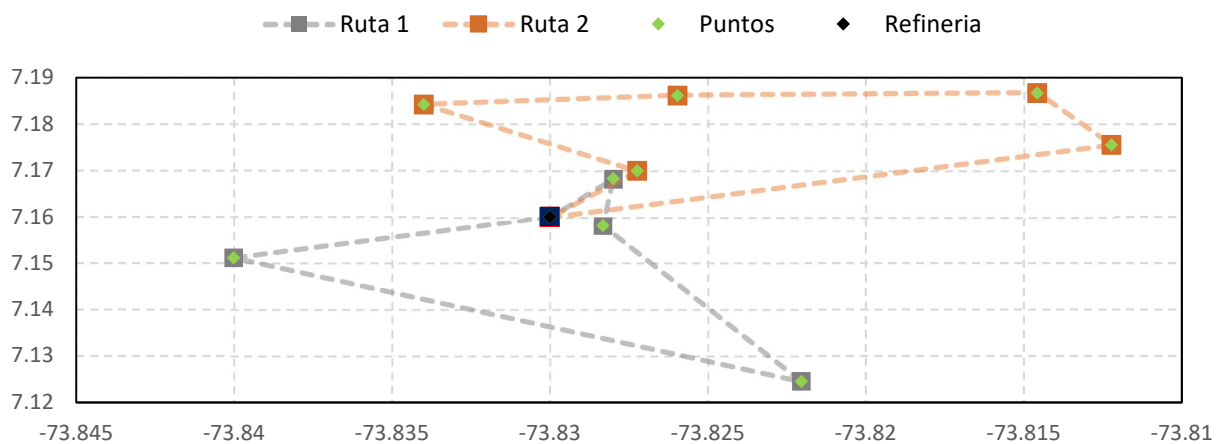


Figura 16

Rutas encontradas para el problema de validación con capacidad de 40 toneladas

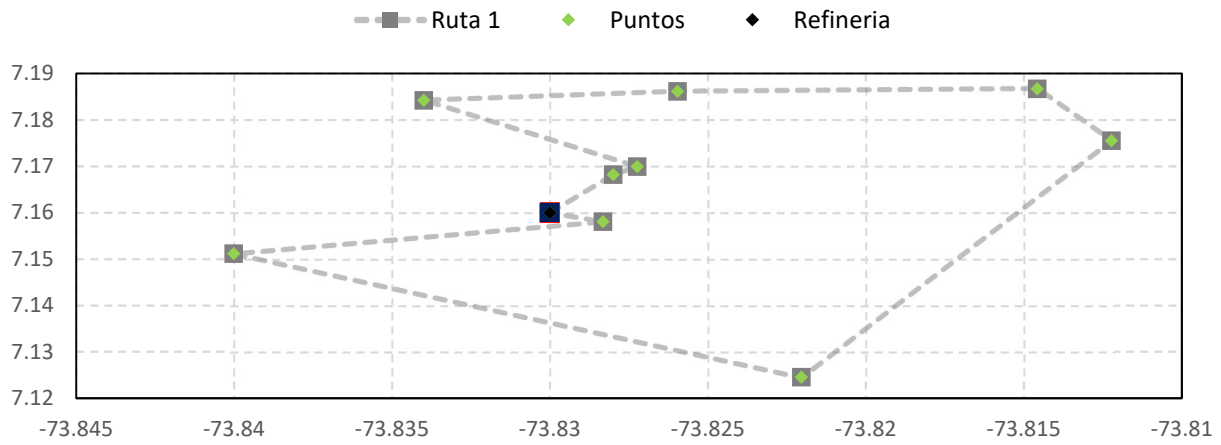


Tabla 9

Resultados obtenidos para los modelos evaluados

Escenario	Capacidad	Rutas	Tiempo
1	10	1-2-6-1	6,750
		1-4-3-1	
		1-5-7-1	
		1-9-8-10-1	
2	20	1-6-2-3-4-1	5,310
		1-10-8-9-5-7-1	
3	40	1-4-7-5-9-8-10-2-6-3-1	4,710

4. Construcción del algoritmo de solución mediante Búsqueda Tabú

El algoritmo propuesto para la solución del modelo de ruteo del transporte de CO₂ en un proyecto de CCUS en el Valle Medio del Magdalena fue el planteado en la metaheurística Búsqueda Tabú, propuesta por Glover & Laguna (1998), la cual se encuentra basada en búsqueda de una mejor solución en las vecindades del problema abordado. Para poder iniciar la metaheurística es necesario contar con una solución inicial que permita generar las rutas que se van a analizar. Para esto fue empleado un algoritmo basado en la heurística de ahorros propuesta por Clarke & Wright (1964). La **Tabla 10** presenta el pseudocódigo planteado para la obtención de las rutas iniciales requeridas por el modelo de Búsqueda Tabú. Una vez conseguida la información base, se procedió a utilizar el algoritmo planteado en la **Tabla 11** para poder dar inicio al mejoramiento de las rutas conforme la metaheurística seleccionada.

Tabla 10

Pseudocódigo del algoritmo empleado para generar la ruta inicial

Algoritmo para generar la ruta inicial - Heurística de ahorros	
1	Inicio
2	Inicialización de parámetros
3	Estimación de los ahorros entre nodos por pares
4	Se ordenan los nodos respecto al que genera mayores ahorros
5	Ciclo iterativo: repetir hasta que no se tengan pares ordenados posibles para usar
6	Se analiza que par ordenado se encuentre disponible para usar
7	Se comprueba que el par cumpla con la restricción de capacidad
8	Se completa la ruta hasta que la restricción de capacidad sea satisfecha
9	Fin
10	Se comprueba que todos los nodos hayan sido incluidos en las rutas
11	Fin
12	Se presentan las rutas obtenidas

Tabla 11*Pseudocódigo del algoritmo empleado para generar la ruta inicial*

Algoritmo para mejorar las rutas obtenidas – Metaheurística búsqueda tabú	
1	Inicio
2	Inicialización de los parámetros
3	Ciclo iterativo: hasta que se acaben las rutas a analizar
4	Se calcula el tiempo inicial de la ruta
5	Si es una ruta con más de dos nodos se inicia la búsqueda tabú
6	Se establecen las posibles combinaciones de nodos a analizar
7	Se crea la lista tabú con las combinaciones encontradas
8	Ciclo iterativo: hasta que se alcancen las iteraciones planteadas
9	Se establecen las rutas temporales y los tiempos que generan
10	Se ordenan las combinaciones encontradas de menor a mayor tiempo
11	Se selecciona la mejor combinación y se comprueba que no esté en la lista tabú
12	Se establece una nueva ruta inicial y se continua con la iteración
13	Se corrobora si se ha encontrado un mejor tiempo de ruta y se procede a guardar
14	Fin
15	Si es una ruta con dos nodos se genera un análisis de mejores tiempos entre nodos
16	Si es una ruta con un solo nodo, se deja como está
17	Fin
18	Fin
19	Se presentan las rutas iniciales
20	Se presentan las rutas generadas en el algoritmo
21	Se presentan las mejores rutas obtenidas

4.1. Resultados obtenidos por los algoritmos

Con el objetivo de poder validar los algoritmos realizados, se procedió a emplear la misma información inicial de distancias, demandas y cantidad de pozos descrita en la sección 3.2. Inicialmente se procedió a realizar la identificación de las rutas mediante el algoritmo de ahorros, las cuales se encuentran plasmadas en la **Tabla 12**. En la **Figura 17** se pueden apreciar el trazado de las rutas en cada uno de los escenarios contemplados, a) un vehículo con capacidad del 10 Ton, b) un vehículo con capacidad de 20 Ton y c) un vehículo con capacidad de 40 Ton.

Tabla 12*Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros*

Capacidad	Rutas
10 ton	{1: [1, 9, 8, 10, 1], 2: [1, 7, 5, 1], 3: [1, 6, 2, 1], 4: [1, 4, 3, 1]}
20 ton	{1: [1, 9, 8, 10, 5, 7, 1], 2: [1, 6, 2, 3, 4, 1]}
40 ton	{1: [1, 9, 8, 10, 5, 7, 4, 3, 2, 6, 1]}

Comparando con la información de control obtenida mediante la herramienta GAMS, se puede apreciar que la cantidad de rutas son las mismas. En el caso del vehículo con 10 Ton de capacidad se puede observar que, aunque se tiene la misma cantidad de rutas, el recorrido se ha generado un poco diferente cambiando el orden en la visita de los nodos 7 y 5 o el 4 y 3. Sin embargo, en este caso en específico que la matriz de tiempos de origen destino es simétrica, este cambio no representa una modificación en la función objetivo. En cuanto al segundo caso del vehículo con capacidad de 20, el orden en la atención de los nodos cambió en una de las rutas ya que de 10-8-9 el algoritmo generó una ruta iniciando por 9-8-10. Por último, en la ruta con mayor capacidad de 40 Ton, se observa que la ruta si presentó un cambio significativo en el trazado de la atención a los nodos.

Una vez obtenidas las rutas iniciales mediante el algoritmo de ahorros, se procedió a realizar la mejora de estas rutas empleando el algoritmo de búsqueda tabú. El método consideró un estado tabú de 2 y una cantidad máxima de 100 iteraciones. Como resultado, se obtuvieron las rutas dispuestas en la **Tabla 13**, en donde se pueden observar dos respuestas dependiendo la condición. La primera es la obtenida en la iteración 100 del algoritmo, y la segunda es la mejor ruta encontrada a lo largo de las rutas analizadas con los cambios generados por el algoritmo con la lista tabú impuesta.

Tabla 13

Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú

Capacidad	Condición	Rutas
10 ton	Iteración	{1: [1, 8, 10, 9, 1], 2: [1, 5, 7, 1], 3: [1, 2, 6, 1], 4: [1, 3, 4, 1]}
	Mejor	{1: [1, 9, 8, 10, 1], 2: [1, 7, 5, 1], 3: [1, 6, 2, 1], 4: [1, 4, 3, 1]}
20 ton	Iteración	{1: [1, 5, 10, 8, 9, 7, 1], 2: [1, 4, 3, 2, 6, 1]}
	Mejor	{1: [1, 10, 8, 9, 5, 7, 1], 2: [1, 6, 2, 3, 4, 1]}
40 ton	Iteración	{1: [1, 10, 8, 9, 5, 7, 4, 3, 6, 2, 1]}
	Mejor	{1: [1, 10, 8, 9, 5, 7, 4, 3, 2, 6, 1]}

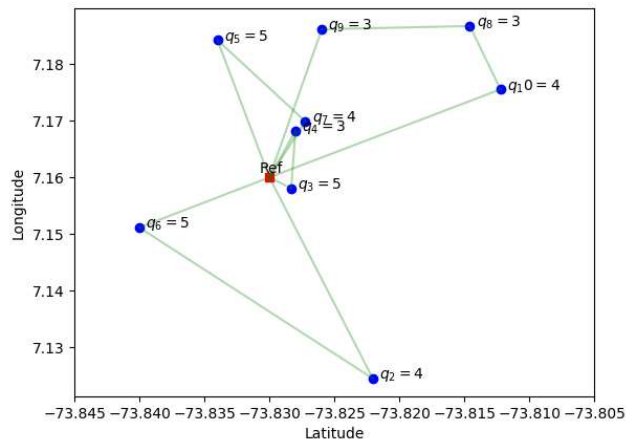
En este caso, se puede observar que en algunas rutas las dos opciones de rutas son similares, principalmente aquellas que solo están compuestas por dos nodos, ya que como se indica en el pseudocódigo, estas solo presentan la opción de compararse entre sí y se selecciona la mejor. Sin embargo, las rutas obtenidas por parte de las rutas más largas si presentan una ruta diferente como lo es el caso de la mejor ruta del escenario del vehículo con capacidad de 40 Ton de la obtenida por el algoritmo de ahorros, 1-9-8-10-5-7-4-3-2-6-1, respecto a la mejor encontrada en el algoritmo de búsqueda tabú, 1-10-8-9-5-7-4-3-2-6-1. Esto indica que el algoritmo construido con el método heurístico permite hacer un barrido por las vecindades de la solución local buscando un mejor escenario con el objetivo de poder minimizar la función de tiempos como lo es el caso del escenario estudiando en la presente investigación.

4.2. Comparación en los resultados obtenidos entre los diferentes métodos

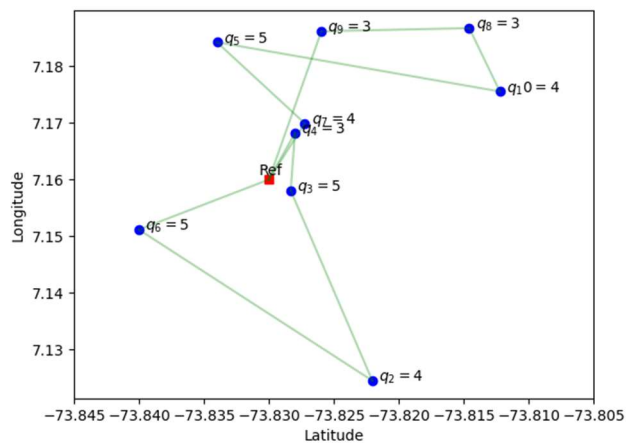
Con el objetivo de poder generar una validación de la información obtenida por parte de los diferentes algoritmos desarrollados, se procedió a realizar una comparación entre los resultados

Figura 17

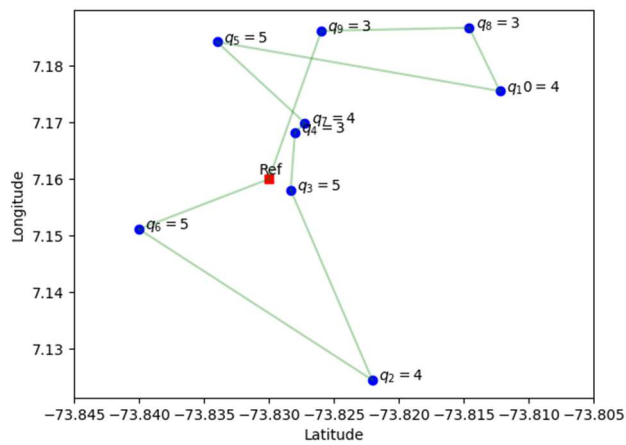
Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros para las instancias evaluadas.



(a)



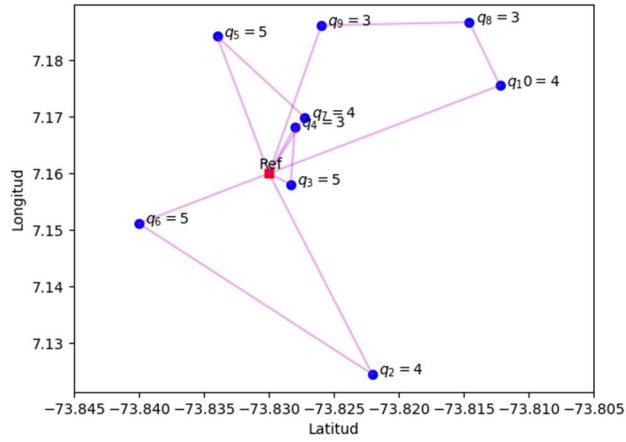
(b)



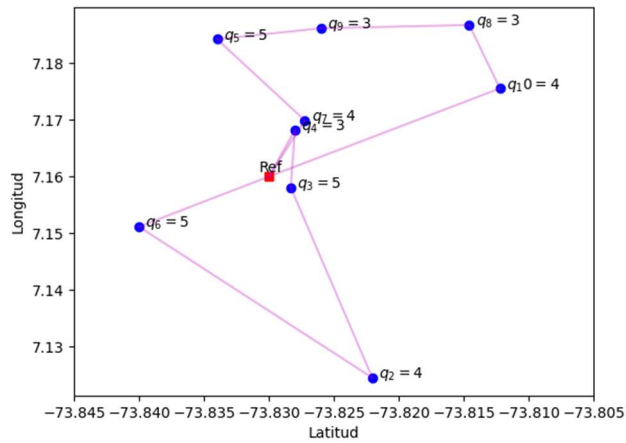
(c)

Figura 18

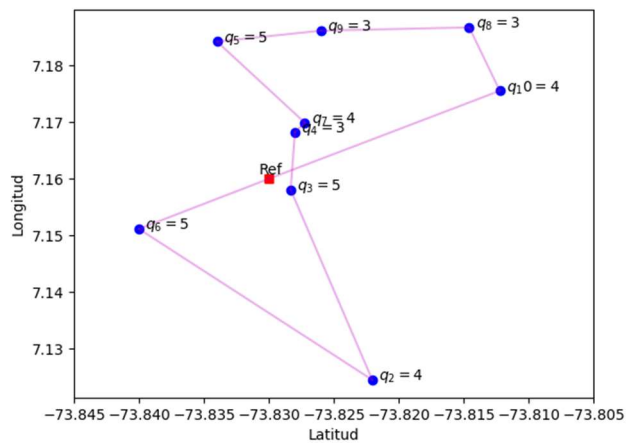
Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú para las instancias evaluadas.



(a)



(b)



(c)

Es por esto que se realizó la comparación entre los tiempos obtenidos como se aprecia en la **Tabla 14**. Como se puede apreciar en la **Tabla 15**, los valores encontrados mediante la técnica heurística generaron los mayores porcentajes de diferencias entre los escenarios analizados. En cuanto a la aplicación de la técnica metaheurística, esta obtuvo un valor máximo de diferencia de 2.5%, por lo cual se considera que los resultados generados por el algoritmo son cercanos al mínimo obtenido mediante la técnica exacta.

Tabla 14

Comparación entre los valores obtenidos por los diferentes métodos empleados

Escenario	Exacto	Heurística	Metaheurística Iteración	Metaheurística Mejor tiempo
10 Ton	7.500	7.500	7.933	7.500
20 Ton	5.900	6.467	6.433	5.900
40 Ton	5.233	5.933	5.467	5.367

Tabla 15

Porcentaje de diferencia en los valores por los diferentes métodos empleados respecto al exacto

Escenario	Heurística	Metaheurística Iteración	Metaheurística Mejor tiempo
10 Ton	0.0%	5.8%	0.0%
20 Ton	9.6%	9.0%	0.0%
40 Ton	13.4%	4.5%	2.5%

5. Aplicación de un caso de estudio en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena

Con el objetivo de poder conocer el efecto que presenta el punto de almacenamiento sobre los tiempos dentro de un proyecto de CCUS, se plantea la solución de un problema de ruteo aplicado a un campo localizado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. En este capítulo se plantea una breve descripción sobre la zona de estudio, el planteamiento del problema de ruteo, la solución del problema de localización del nuevo punto de almacenamiento y el efecto que genera sobre el proyecto en términos de tiempos de operación.

5.1. Valle Medio del Magdalena

El Valle Medio del Magdalena (VMM) es una de las cuencas petrolíferas maduras más importantes en Colombia. El inicio de la industria de hidrocarburos se remonta a la perforación del pozo Infantas 1, ubicado cerca de la ciudad de Barrancabermeja dentro de los límites de la cuenca (Vasquez, 1994). El VMM está situado entre las Cordilleras Central y Oriental en el centro norte de Colombia, como se muestra en la **Figura 19**, y limita al norte con la Falla de Bucaramanga, cerca de la ciudad de El Banco, y al sur con la Falla de Cambao, en las cercanías de la ciudad de Jerusalén. El VMM cubre un área de 28.300 km²; su altitud, al nivel del río Magdalena, fluctúa entre 150 y 50 m.s.n.m. aproximadamente. El VMM es bastante estrecho al norte y al sur, pero se ensancha considerablemente en el centro (Mojica & Franco, 1990).

Existen diferentes fuentes de emisiones de dióxido de carbono, sin embargo, las tecnologías de captura existentes permiten que los puntos de alta capacidad de generación sean los mejores candidatos para la captura de dióxido de carbono (de Coninck et al., 2009). Varios autores han señalado que las fuentes más comunes de alta capacidad de emisión de dióxido de carbono

son las cementeras, las acerías, las plantas petroquímicas, las centrales eléctricas y las refinerías (Azar et al., 2006; Lotz & Brent, 2008). En el caso de VMM, la refinería de Barrancabermeja representa una fuente importante de CO₂, y se considera la principal emisión con alrededor de 3.7 Mt CO_{2eq}/y (É. Yáñez et al., 2022).

Figura 19

Ubicación del VMM en Colombia.



Una vez capturado el dióxido de carbono, es necesario considerar su punto de eliminación para almacenarlo o utilizarlo en procesos posteriores. El almacenamiento geológico requiere un depósito y una buena roca de sellado para atrapar el CO₂ asegurando su captura durante un largo periodo. Existen diferentes opciones para el almacenamiento de dióxido de carbono. Sin embargo, varios autores coinciden en que las principales ubicaciones en cuencas sedimentarias son formaciones salinas profundas con o sin trampas estructurales, yacimientos agotados de petróleo y gas y yacimientos de carbón (Desideri et al., 2008).

Muchas características de los yacimientos de petróleo y gas los convierten en importantes lugares de destino para el almacenamiento geológico de CO₂. Las condiciones que mantienen el

petróleo y el gas tras su migración a las trampas hacen que el sistema sea propicio para el secuestro de CO₂ (Carr et al., 2009). En el desarrollo del VMM, se han aplicado varios métodos de recuperación de petróleo en la cuenca, desde el proceso de inyección de agua hasta la inundación de gas, pasando por la inyección de dióxido de carbono. Esta implementación se utilizó en el esquema de inyección cíclica en el campo Galán, con 9 pilotos entre 1989 y 1992, y en el campo Llanito, alrededor de 2008. Sin embargo, los proyectos se cerraron debido al suministro irregular de CO₂ en la zona (Castro et al., 2010). Actualmente, se están realizando esfuerzos para volver a desarrollar estas tecnologías en el marco de proyectos de utilización y almacenamiento de CO₂ debido a las propiedades de los yacimientos. Por lo anterior, el campo Llanito es seleccionado como el campo objetivo para el presente estudio

5.2. Modelo de ruteo de vehículos para el transporte de CO₂

Para el estudio se han seleccionado una serie de pozos petroleros ubicados en un activo cerca a la fuente de emisión de la zona, que en este caso es la refinería de Barrancabermeja. En la **Tabla 16** se encuentra especificada la localización, así como la demanda en Ton que se le fue asignado al pozo. La **Figura 20** representa la matriz origen destino de la zona de estudio y en la **Figura 21** se observa la distribución de los pozos (azul) y la refinería (rojo) en el mapa.

Para poder evaluar el modelo, se han planteado tres escenarios distintos referentes a la capacidad del vehículo que será empleado en el proceso. Se consideraron vehículos de 10 Ton, 20 Ton y 40 Ton de capacidad con el objetivo de poder evaluar las diferentes configuraciones obtenidas en las rutas para el proceso. Esto permitirá poder conocer la necesidad del proyecto y las posibles soluciones conforme a las ofertas del mercado para el transporte del gas.

Tabla 16*Localización de los nodos del caso de estudio*

No	Longitud	Latitud	Q[Ton]	No	Longitud	Latitud	Q[Ton]
1	-73.88	7.07	-	26	-73.81221771	7.17553278	4
2	-73.85110396	7.15838646	4	27	-73.83419289	7.15835685	5
3	-73.85110396	7.15838646	5	28	-73.83028585	7.17206501	5
4	-73.84023982	7.14304137	5	29	-73.85020199	7.16469346	3
5	-73.84023982	7.14304137	5	30	-73.83795648	7.1772706	3
6	-73.84499899	7.1627999	4	31	-73.83023484	7.18792838	5
7	-73.84499899	7.1627999	5	32	-73.84559233	7.1497862	4
8	-73.85056004	7.1431675	5	33	-73.83322636	7.15215452	4
9	-73.85056004	7.1431675	4	34	-73.82931998	7.16574738	4
10	-73.84001384	7.15115438	3	35	-73.81593432	7.16337995	4
11	-73.84001384	7.15115438	4	36	-73.845482	7.16546873	4
12	-73.81457086	7.1867114	3	37	-73.83924843	7.1672446	5
13	-73.82300228	7.16711269	4	38	-73.80286235	7.19672326	5
14	-73.84519316	7.14696143	4	39	-73.82692782	7.16956641	3
15	-73.84474207	7.14388685	3	40	-73.84018298	7.17311912	3
16	-73.84295616	7.15320056	4	41	-73.83035291	7.13891406	5
17	-73.82820302	7.16785361	5	42	-73.84690841	7.156564	4
18	-73.84411357	7.15926734	5	43	-73.82364516	7.17409023	3
19	-73.83150771	7.16216784	4	44	-73.84253899	7.15020172	5
20	-73.84800003	7.14604845	3	45	-73.83123593	7.17724895	4
21	-73.85580069	7.15105487	4	46	-73.83687112	7.15582757	3
22	-73.83051811	7.15578804	4	47	-73.83997698	7.15349968	4
23	-73.83459258	7.16327602	4	48	-73.83684168	7.15154042	5
24	-73.84903296	7.15221688	3	49	-73.83963678	7.16578448	4
25	-73.82457144	7.1566506	4	50	-73.84198227	7.17050784	4

En primera instancia se obtienen las rutas mediante la heurística de ahorros, con el objetivo de poder conocer una solución local y poder ingresarla al algoritmo de la metaheurística. En la **Tabla 17** se pueden observar las soluciones encontradas para cada uno de los escenarios con un total de 24, 12 y 6 rutas respectivamente. En la **Tabla 18** se encuentran las rutas resultado de la aplicación del algoritmo de búsqueda tabú. Los tiempos encontrados se plasmaron en la **Tabla 19**, así como los porcentajes de reducción o aumento encontrados respecto a la ruta de ahorros.

Figura 20

Matriz origen destino de los nodos del caso de estudio.

1	0.0	9.3	9.3	8.4	8.4	10.0	10.0	7.9	7.9	9.1	9.1	13.4	11.3	8.5	8.2	9.2	11.1	9.7	10.5	8.3	8.5	10.0	10.4	8.8	10.3	12.6	10.0	11.4	10.0	11.6	12.8	8.7	9.5	10.9	11.4	10.2	10.6	14.9	11.3	11.1	8.5	9.3	11.9	8.9	11.8	9.7	9.3	10.4	10.8			
2	9.3	0.0	0.0	1.9	1.9	0.8	0.8	1.6	1.6	1.4	1.4	4.7	3.0	1.3	1.6	1.0	2.5	0.8	2.0	1.3	0.9	2.1	1.8	0.7	2.7	4.3	1.7	2.5	0.7	2.4	3.7	1.1	1.9	2.3	3.6	1.0	1.5	6.2	2.7	1.9	2.9	0.5	3.2	1.2	2.8	1.5	1.3	1.6	1.4	1.6		
3	9.3	0.0	0.0	1.9	1.9	0.8	0.8	1.6	1.6	1.4	1.4	4.7	3.0	1.3	1.6	1.0	2.5	0.8	2.0	1.3	0.9	2.1	1.8	0.7	2.7	4.3	1.7	2.5	0.7	2.4	3.7	1.1	1.9	2.3	3.6	1.0	1.5	6.2	2.7	1.9	2.9	0.5	3.2	1.2	2.8	1.5	1.3	1.6	1.4	1.6		
4	8.4	1.9	1.9	0.0	0.0	2.1	2.1	1.1	1.1	0.9	0.9	5.1	3.0	0.7	0.5	1.1	2.8	1.7	2.2	0.9	1.8	1.7	2.2	1.3	2.1	4.3	1.7	3.1	2.4	3.5	4.6	0.9	1.2	2.6	3.2	2.4	2.5	6.6	3.0	3.1	1.1	1.6	3.6	0.8	3.6	1.4	1.1	1.0	2.3	2.8		
5	8.4	1.9	1.9	0.0	0.0	2.1	2.1	1.1	1.1	0.9	0.9	5.1	3.0	0.7	0.5	1.1	2.8	1.7	2.2	0.9	1.8	1.7	2.2	1.3	2.1	4.3	1.7	3.1	2.4	3.5	4.6	0.9	1.2	2.6	3.2	2.4	2.5	6.6	3.0	3.1	1.1	1.6	3.6	0.8	3.6	1.4	1.1	1.0	2.3	2.8		
6	10.0	0.8	0.8	2.1	2.1	0.0	0.0	2.1	2.1	1.3	1.3	3.9	2.3	1.6	1.9	1.0	1.8	0.4	1.4	1.8	1.6	1.7	1.1	1.2	2.2	3.6	1.2	1.8	0.6	1.7	3.0	1.4	1.6	1.6	3.0	0.3	0.8	5.5	2.0	1.2	2.9	0.7	2.5	1.3	2.0	1.1	1.1	1.4	0.7	0.9		
7	10.0	0.8	0.8	2.1	2.1	0.0	0.0	2.1	2.1	1.3	1.3	3.9	2.3	1.6	1.9	1.0	1.8	0.4	1.4	1.8	1.6	1.7	1.1	1.2	2.2	3.6	1.2	1.8	0.6	1.7	3.0	1.4	1.6	1.6	3.0	0.3	0.8	5.5	2.0	1.2	2.9	0.7	2.5	1.3	2.0	1.1	1.1	1.4	0.7	0.9		
8	7.9	1.6	1.6	1.1	1.1	2.1	2.1	0.0	0.0	1.4	1.4	5.7	3.7	0.7	0.6	1.3	3.4	1.8	2.7	0.4	1.0	2.4	2.6	1.0	3.0	5.1	2.3	3.6	2.2	3.7	5.0	0.9	2.0	3.1	4.1	2.3	2.7	7.2	3.6	3.2	2.1	1.4	4.1	1.1	4.0	1.9	1.5	1.7	2.6	2.9		
9	7.9	1.6	1.6	1.1	1.1	2.1	2.1	0.0	0.0	1.4	1.4	5.7	3.7	0.7	0.6	1.3	3.4	1.8	2.7	0.4	1.0	2.4	2.6	1.0	3.0	5.1	2.3	3.6	2.2	3.7	5.0	0.9	2.0	3.1	4.1	2.3	2.7	7.2	3.6	3.2	2.1	1.4	4.1	1.1	4.0	1.9	1.5	1.7	2.6	2.9		
10	9.1	1.4	1.4	0.9	0.9	1.3	1.3	1.4	1.4	0.0	0.0	4.4	2.4	0.7	0.9	0.4	2.1	1.0	1.4	1.0	1.4	1.0	1.6	1.1	1.4	1.0	1.7	3.7	1.0	2.4	1.7	2.7	3.9	0.6	0.7	1.9	2.8	1.6	1.7	5.9	2.3	2.2	1.6	0.9	2.9	0.3	2.8	0.6	0.3	0.4	1.5	2.0
11	9.1	1.4	1.4	0.9	0.9	1.3	1.3	1.4	1.4	0.0	0.0	4.4	2.4	0.7	0.9	0.4	2.1	1.0	1.4	1.0	1.4	1.0	1.6	1.1	1.4	1.0	1.7	3.7	1.0	2.4	1.7	2.7	3.9	0.6	0.7	1.9	2.8	1.6	1.7	5.9	2.3	2.2	1.6	0.9	2.9	0.3	2.8	0.6	0.3	0.4	1.5	2.0
12	13.4	4.7	4.7	5.1	5.1	3.9	3.9	5.7	5.7	4.4	4.4	0.0	2.2	5.1	5.3	4.4	2.4	4.1	3.0	5.3	5.5	3.5	4.1	4.9	3.2	1.2	3.5	2.2	4.2	2.6	1.6	4.9	4.0	2.6	2.4	3.8	3.2	1.6	2.2	2.9	5.1	4.5	4.6	2.0	3.9	4.2	4.2	3.3	3.2			
13	11.3	3.0	3.0	3.0	3.0	2.3	2.3	3.7	3.7	2.4	2.4	2.2	0.0	3.0	3.2	2.5	0.6	2.3	1.0	3.3	3.7	1.4	1.3	3.0	1.1	1.4	1.5	0.8	2.8	1.9	2.3	2.9	1.9	0.7	0.8	2.3	1.7	3.6	0.5	1.9	3.0	2.7	0.8	2.6	1.4	1.8	2.2	2.1	1.7	2.0		
14	8.5	1.3	1.3	0.7	0.7	1.6	1.6	0.7	0.7	0.7	0.7	5.1	3.0	0.0	0.4	0.7	2.7	1.3	2.1	0.3	1.2	1.8	2.0	0.7	2.3	4.4	1.6	3.0	1.9	3.2	4.4	0.3	1.4	2.5	3.4	1.9	2.2	6.6	3.0	2.7	1.7	1.5	0.5	3.4	1.3	0.9	1.0	2.0	2.4			
15	8.2	1.6	1.6	0.5	0.5	1.9	1.9	0.6	0.6	0.9	0.9	5.3	3.2	0.4	0.0	1.0	3.0	1.6	2.3	0.4	1.4	1.9	2.2	1.0	2.4	4.6	1.8	3.2	2.2	3.5	4.7	0.6	1.5	2.7	3.5	2.2	2.4	6.8	3.2	3.0	1.6	1.3	3.7	0.7	3.6	1.5	1.1	1.1	2.3	2.7		
16	9.2	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.3	1.3	0.4	0.4	4.4	2.5	0.7	1.0	0.0	2.1	0.7	1.5	0.9	1.4	1.3	1.4	0.7	1.9	3.8	1.1	2.3	1.4	2.5	3.7	0.5	1.0	1.9	2.9	1.3	1.5	6.0	2.3	2.1	2.0	0.6	2.9	0.4	2.7	0.7	0.3	0.7	1.4	1.8		
17	11.1	2.5	2.5	2.8	2.8	1.8	1.8	3.4	3.4	2.1	2.1	2.4	0.6	2.7	3.0	2.1	0.0	1.9	0.7	3.0	3.3	1.3	0.8	2.7	1.2	1.8	1.2	0.5	2.3	1.4	2.1	2.6	1.7	0.3	1.4	1.8	1.2	3.9	0.3	1.4	3.0	2.2	0.8	2.3	1.0	1.5	1.9	1.9	1.2	1.5		
18	9.7	0.8	0.8	1.7	1.7	0.4	0.4	1.8	1.8	1.0	1.0	4.1	2.3	1.3	1.6	0.7	1.9	0.0	1.3	1.4	1.5	1.5	1.1	0.9	2.0	3.6	1.0	1.9	0.9	2.0	3.2	1.0	1.4	1.7	2.9	0.7	1.0	5.6	2.1	1.5	2.5	0.4	2.6	1.0	2.3	0.9	0.8	1.1	0.8	1.2		
19	10.5	2.0	2.0	2.2	2.2	1.4	1.4	2.7	2.7	1.4	1.4	3.0	1.0	2.1	2.3	1.5	0.7	1.3	0.0	2.4	2.7	0.7	0.4	2.1	0.9	2.4	0.5	1.9	1.7	2.6	1.9	1.1	0.9	1.6	1.5	1.0	4.5	0.9	1.4	2.4	1.7	1.5	1.7	1.6	0.9	1.3	1.2	0.9	1.4			
20	8.3	1.3	1.3	0.9	0.9	1.8	1.8	0.4	0.4	1.0	1.0	5.3	3.3	0.3	0.4	0.9	3.0	1.4	2.4	0.0	1.0	2.1	2.2	0.7	2.6	4.7	1.9	3.2	1.9	3.3	4.6	0.5	1.6	2.8	3.7	2.0	2.3	6.8	3.2	2.9	2.0	1.1	3.8	0.7	3.6	1.5	1.1	1.3	2.2	2.6		
21	8.5	0.9	0.9	1.8	1.8	1.6	1.6	1.0	1.0	1.6	1.6	5.5	3.7	1.2	1.4	1.4	3.3	2.7	1.0	0.0	2.6	2.5	0.7	3.2	5.0	2.3	3.4	1.5	3.2	4.5	1.1	2.3	3.1	4.2	1.8	2.4	7.0	3.5	2.8	2.9	1.1	4.0	1.4	3.6	2.0	1.7	1.9	2.2	2.4			
22	10.0	2.1	2.1	1.7	1.7	1.7	1.7	2.4	2.4	1.1	1.1	3.5	1.4	1.8	1.9	1.3	1.3	1.5	0.7	2.1	2.6	0.0	0.9	1.9	0.7	2.7	0.5	1.7	2.2	2.3	3.3	1.7	0.5	1.1	1.7	1.8	1.5	5.0	1.5	2.0	1.7	1.7	1.0	1.4	1.2	0.8	1.4	1.9				
23	10.4	1.8	1.8	2.2	2.2	1.1	1.1	2.6	2.6	1.4	1.4	3.1	1.3	2.0	2.2	1.4	0.8	1.1	0.4	2.2	2.5	0.9	0.0	1.9	1.3	2.6	0.5	1.0	1.6	1.5	2.6	1.8	1.2	0.6	1.9	1.2	0.7	4.7	1.0	1.2	2.5	1.6	1.6	1.5	1.8	1.2	0.6	1.1	2.6	1.1		
24	8.8	0.7	0.7	1.3	1.3	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	4.9	3.0	0.7	1.0	0.7	2.7	0.9	2.1	0.7	0.7	1.9	1.0	0.0	2.5	4.4	1.7	2.8	1.3	2.8	4.1	0.5	1.6	2.4	3.5	1.4	1.8	6.5	2.9	2.3	2.3	0.5	3.4	0.7	3.1	1.3	1.0	1.3	1.7	2.0		
25	10.3	2.7	2.7	2.1	2.1	2.2	2.2	3.0	3.0	1.7	1.7	3.2	1.1	2.3	2.4	1.9	1.2	2.0	0.9	2.6	3.2	0.7	1.3	2.5	0.0	2.3	1.0	1.7	2.7	2.5	3.2	2.3	1.0	1.1	1.1	2.3	1.9	4.6	1.4	2.3	1.9	2.0	2.2	1.3	1.6	1.4	1.8	2.3				
26	12.6	4.3	4.3	4.3	4.3	3.6	3.6	5.1	5.1	3.7	3.7	1.2	1.4	4.4	4.6	3.8	1.8	3.6	2.4	4.7	5.0	2.7	2.6	4.4	2.3	0.0	2.8	1.9	4.0	2.6	2.2	4.3	3.2	2.0	1.3	3.5	2.9	2.4	1.6	2.9	4.1	4.0	1.2	4.0	2.0	3.2	3.6	3.5	3.0	3.1		
27	10.0	1.7	1.7	1.7	1.7	1.2	1.2	2.3	2.3	1.0	1.0	5.0	3.5	1.5	1.6	1.8	1.1	1.2	1.0	0.5	1.9	2.3	0.5	0.5	1.7	1.0	2.8	0.5	1.8	2.0	3.0	1.5	0.7	0.9	1.9	1.4	1.1	5.0	1.4	1.6	2.0	1.3	1.9	1.2	0.6	0.8	0.8	1.0	1.5			
28	11.4	2.5	2.5	3.1	3.1	1.6	1.6	3.0	3.0	2.4	2.4	2.4	0.9	3.0	3.2	2.3	0.5	1.9	1.0	3.2	0.4	1.7	1.9	2.3	1.7	1.9	1.5	0.0	2.2	1.6	2.9	2.1	0.7	1.7	1.1	3.7	0.5	1.0	3.4	2.3	0.7	2.6	0.6	1.1	2.1	2.2	1.2	1.2				
29	10.0	0.7	0.7	2.4	2.4	0.6	0.6	2.2	2.2	1.7	1.7	4.2	2.8	1.9	2.2	1.4	2.3	0.9	1.9	1.9	1.5	2.2	1.6	1.3	2.7	4.0	1.8	2.2	0.0	1.8	3.1	1.6	2.2	2.1	3.5	0.5	1.2	5.8	2.4	1.4	3.3	0.9	2.9	1.7	2.3	1.7	1.6	1.9	1.1	1.1		
30	11.6	2.4	2.4	3.5	3.5	1.7	1.7	3.7	3.7	2.7	2.7	2.6	1.9	3.2	3.5	2.5	1.4	2.0	1.7	3.3	3.2	2.3	1.5	2.8	2.5	2.6	2.0	1.8	1.0	1.4	2																					

Tabla 17

Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros

Capacidad	Rutas
10 ton	{1: [1, 38, 12, 1], 2: [1, 45, 31, 1], 3: [1, 26, 43, 39, 1], 4: [1, 40, 30, 1], 5: [1, 28, 17, 1], 6: [1, 13, 35, 1], 7: [1, 37, 50, 1], 8: [1, 19, 34, 1], 9: [1, 23, 49, 1], 10: [1, 6, 7, 1], 11: [1, 36, 29, 1], 12: [1, 25, 22, 1], 13: [1, 46, 27, 1], 14: [1, 42, 18, 1], 15: [1, 2, 5, 1], 16: [1, 33, 48, 1], 17: [1, 16, 47, 1], 18: [1, 10, 11, 1], 19: [1, 32, 44, 1], 20: [1, 4, 3, 1], 21: [1, 14, 24, 1], 22: [1, 20, 15, 1], 23: [1, 8, 9, 1], 24: [1, 21, 41, 1]}
20 ton	{1: [1, 38, 12, 26, 43, 31, 1], 2: [1, 45, 30, 40, 28, 39, 1], 3: [1, 13, 35, 17, 34, 1], 4: [1, 37, 50, 49, 23, 1], 5: [1, 6, 7, 36, 29, 1], 6: [1, 19, 27, 22, 25, 1], 7: [1, 46, 47, 48, 33, 10, 1], 8: [1, 42, 18, 16, 11, 1], 9: [1, 2, 5, 4, 3, 1], 10: [1, 32, 44, 24, 14, 20, 1], 11: [1, 8, 9, 15, 21, 1], 12: [1, 41, 1]}
40 ton	{1: [1, 38, 12, 26, 43, 31, 45, 30, 40, 28, 39, 1], 2: [1, 13, 35, 17, 34, 19, 23, 37, 50, 49, 1], 3: [1, 6, 7, 36, 29, 18, 27, 22, 25, 33, 1], 4: [1, 46, 47, 48, 10, 11, 16, 42, 2, 5, 1], 5: [1, 32, 44, 24, 14, 20, 15, 4, 3, 21, 1], 6: [1, 8, 9, 41, 1]}

Tabla 18

Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú

Capacidad	Condición	Rutas
10 ton	Iteración	{1: [1, 12, 38, 1], 2: [1, 31, 45, 1], 3: [1, 43, 39, 26, 1], 4: [1, 30, 40, 1], 5: [1, 17, 28, 1], 6: [1, 35, 13, 1], 7: [1, 50, 37, 1], 8: [1, 34, 19, 1], 9: [1, 49, 23, 1], 10: [1, 7, 6, 1], 11: [1, 29, 36, 1], 12: [1, 22, 25, 1], 13: [1, 27, 46, 1], 14: [1, 18, 42, 1], 15: [1, 5, 2, 1], 16: [1, 48, 33, 1], 17: [1, 47, 16, 1], 18: [1, 11, 10, 1], 19: [1, 44, 32, 1], 20: [1, 3, 4, 1], 21: [1, 24, 14, 1], 22: [1, 15, 20, 1], 23: [1, 9, 8, 1], 24: [1, 41, 21, 1]}
	Mejor	{1: [1, 38, 12, 1], 2: [1, 45, 31, 1], 3: [1, 26, 43, 39, 1], 4: [1, 40, 30, 1], 5: [1, 28, 17, 1], 6: [1, 13, 35, 1], 7: [1, 37, 50, 1], 8: [1, 19, 34, 1], 9: [1, 23, 49, 1], 10: [1, 6, 7, 1], 11: [1, 36, 29, 1], 12: [1, 25, 22, 1], 13: [1, 46, 27, 1], 14: [1, 42, 18, 1], 15: [1, 2, 5, 1], 16: [1, 33, 48, 1], 17: [1, 16, 47, 1], 18: [1, 10, 11, 1], 19: [1, 32, 44, 1], 20: [1, 4, 3, 1], 21: [1, 14, 24, 1], 22: [1, 20, 15, 1], 23: [1, 8, 9, 1], 24: [1, 21, 41, 1]}

20 ton	Iteración	{1: [1, 31, 43, 12, 38, 26, 1], 2: [1, 40, 30, 28, 45, 39, 1], 3: [1, 34, 17, 35, 13, 1], 4: [1, 23, 49, 50, 37, 1], 5: [1, 29, 36, 7, 6, 1], 6: [1, 25, 19, 22, 27, 1], 7: [1, 33, 46, 47, 10, 48, 1], 8: [1, 11, 16, 18, 42, 1], 9: [1, 4, 2, 5, 3, 1], 10: [1, 14, 32, 24, 44, 20, 1], 11: [1, 15, 21, 8, 9, 1], 12: [1, 41, 1]}
	Mejor	{1: [1, 31, 12, 38, 26, 43, 1], 2: [1, 40, 30, 45, 28, 39, 1], 3: [1, 35, 13, 17, 34, 1], 4: [1, 50, 37, 49, 23, 1], 5: [1, 6, 7, 36, 29, 1], 6: [1, 27, 19, 25, 22, 1], 7: [1, 10, 47, 46, 33, 48, 1], 8: [1, 42, 18, 16, 11, 1], 9: [1, 4, 3, 2, 5, 1], 10: [1, 24, 44, 32, 14, 20, 1], 11: [1, 15, 9, 8, 21, 1], 12: [1, 41, 1]}
40 ton	Iteración	{1: [1, 43, 26, 38, 12, 31, 45, 40, 30, 28, 39, 1], 2: [1, 35, 13, 17, 34, 19, 23, 37, 49, 50, 1], 3: [1, 29, 7, 6, 36, 18, 27, 22, 25, 33, 1], 4: [1, 10, 11, 47, 48, 46, 16, 42, 2, 5, 1], 5: [1, 20, 32, 44, 24, 14, 15, 4, 3, 21, 1], 6: [1, 9, 41, 8, 1]}
	Mejor	{1: [1, 43, 26, 38, 12, 31, 45, 30, 40, 28, 39, 1], 2: [1, 35, 13, 17, 34, 19, 23, 49, 37, 50, 1], 3: [1, 29, 36, 7, 6, 18, 27, 22, 25, 33, 1], 4: [1, 10, 11, 48, 46, 47, 16, 42, 2, 5, 1], 5: [1, 20, 24, 44, 32, 14, 15, 4, 3, 21, 1], 6: [1, 8, 9, 41, 1]}

Tabla 19

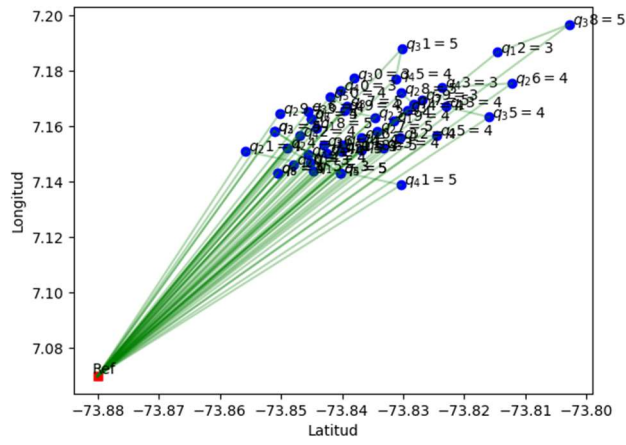
Comparación entre los valores obtenidos por los diferentes métodos empleados

Escenario	Heurística	Metaheurística Iteración	%	Metaheurística Mejor tiempo	%
10 Ton	16.5867	16.7467	0.96%	16.5867	0.00%
20 Ton	8.7833	8.7700	-0.15%	8.5500	-2.66%
40 Ton	4.9100	4.8700	-0.81%	4.7733	-2.78%

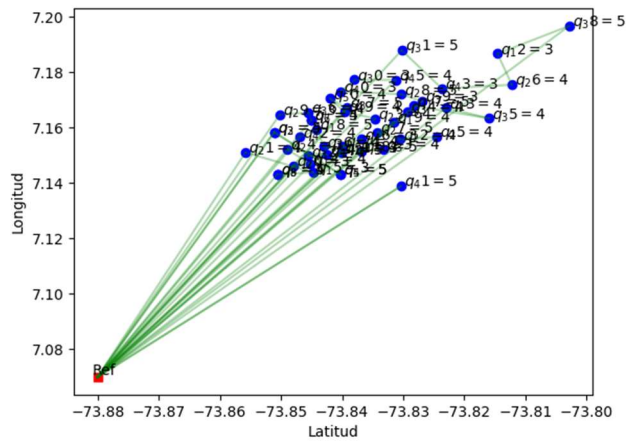
Como se evidencia, el aumento de la capacidad de los vehículos permite generar el recorrido en un menor tiempo ya que las rutas encontradas son de mayor extensión. Esto permite de igual manera poder encontrar mejores valores en la minimización de la función ya que presenta mayor cantidad de nodos a evaluar permitiendo una mayor cantidad de combinaciones posibles. Esto se puede observar en los porcentajes de mejoras obtenidos en las técnicas metaheurísticas, los cuales aumentan conforme las rutas son más grandes. Para este caso de estudio se obtuvo una

Figura 22

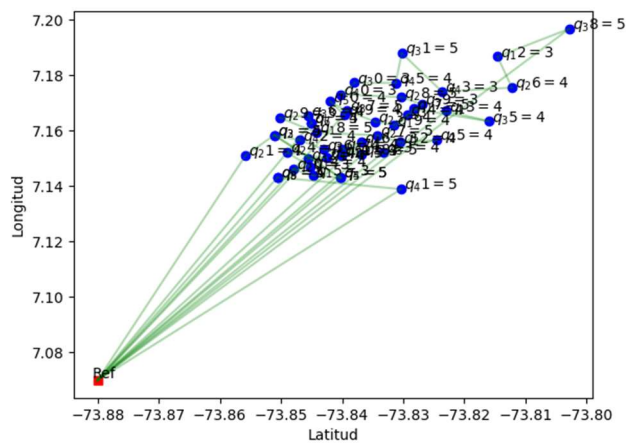
Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros para a) 10 Ton, b) 20 Ton y c) 40 Ton .



(a)



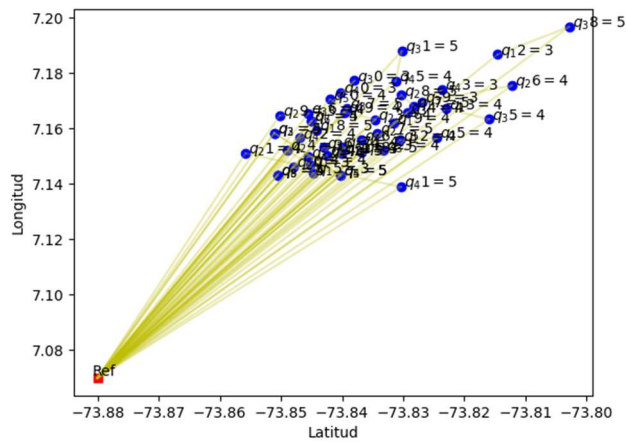
(b)



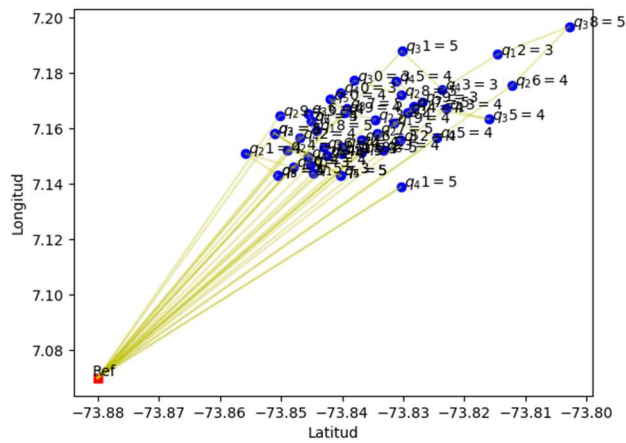
(c)

Figura 23

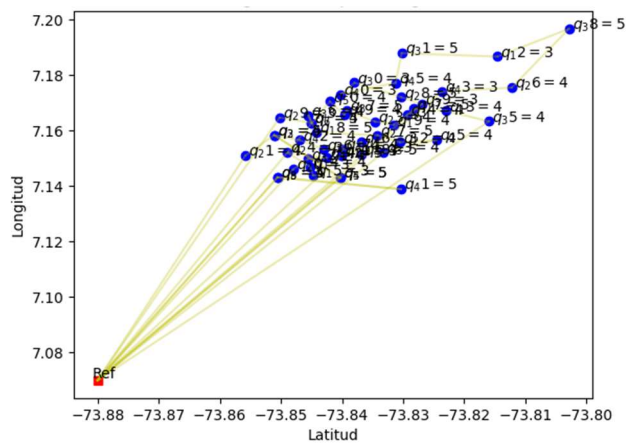
Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton



(a)



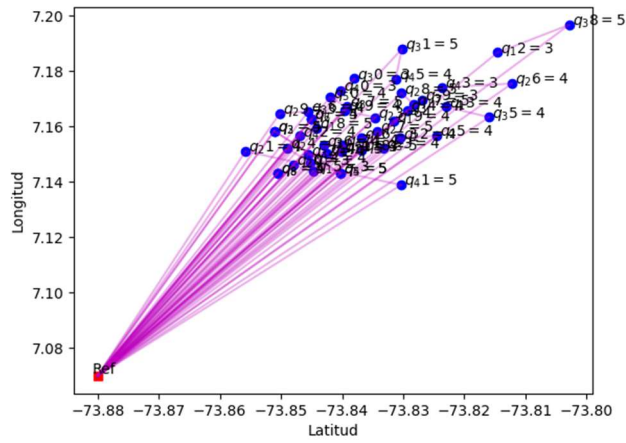
(b)



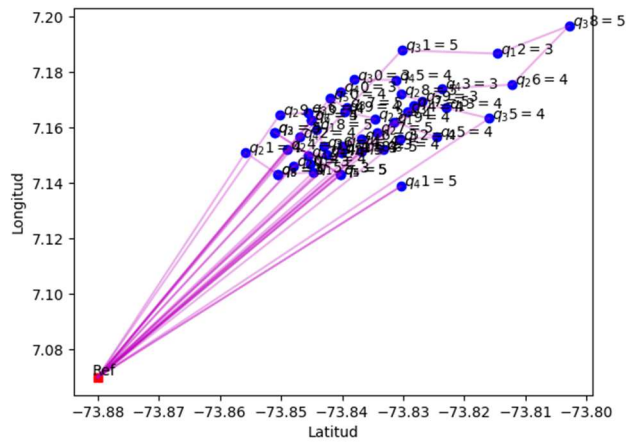
(c)

Figura 24

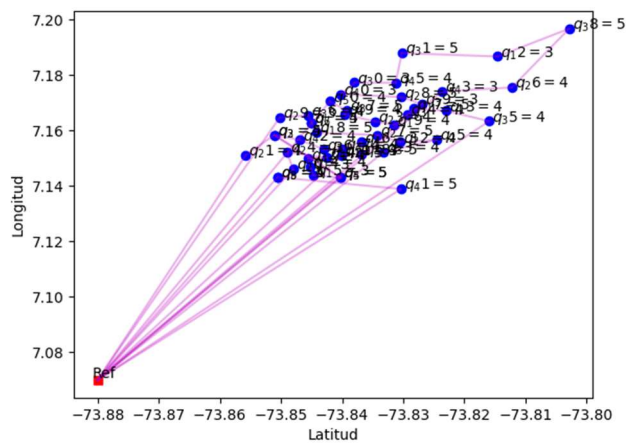
Mejores rutas encontradas con el algoritmo búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton .



(a)



(b)



(c)

reducción de 2,78% respecto a la ruta encontrada en la heurística de ahorros. Las rutas son representadas en la **Figura 22**, **Figura 23** y **Figura 24** obtenidas mediante las técnicas empleadas para los escenarios de 10, 20 y 40 Ton en los literales a), b) y c) respectivamente. Como se puede apreciar, los vehículos deben realizar grandes recorridos hasta el punto de despacho generando un incremento en el tiempo del proceso, debido a que el campo petrolero se encuentra alejado del punto de emisión de los gases. Es por esto, que surge la idea de poder evaluar el proceso de ruteo desde un punto de almacenamiento intermedio a ubicar en el campo.

5.3. Localización de una facilidad de almacenamiento en campo

Para el problema de localización, se consideran los nodos y sus respectivas demandas. Los problemas. Para lograr este objetivo, se planteó un algoritmo en Python que permitió encontrar la localización de un punto de almacenamiento intermedio considerando el problema del centroide de las coordenadas de los pozos, así como la carga de estos. La **Figura 25** permite observar la distribución de los nodos en el activo petrolero a analizar y la **Figura 27** representa la matriz origen destino del nuevo modelo. Una vez aplicado el algoritmo, se encontró que el punto de almacenamiento intermedio debía ser localizado en la coordenada de 7.160279972499999 latitud y -73.83695924924999 longitud como se aprecia en la **Figura 26**.

La **Tabla 20** y **Tabla 21** representan las rutas encontradas para el modelo en este caso con una nueva locación de inicio relacionada a un punto de almacenamiento intermedio. La **Tabla 22** representa las diferencias encontradas entre los valores de los tiempos para cada uno de los escenarios analizados. Se puede evidenciar que la metaheurística logró generar una disminución en todos los casos y en el caso del escenario 2 logró una disminución de 4.2%. Las figuras **Figura**

28, **Figura 29** y **Figura 30** representan las rutas encontradas con los diferentes métodos para los vehículos con capacidades de 10, 20 y 40 Ton en los literales a), b) y c) respectivamente.

Figura 25

Representación de la localización de los nodos en el activo petrolero

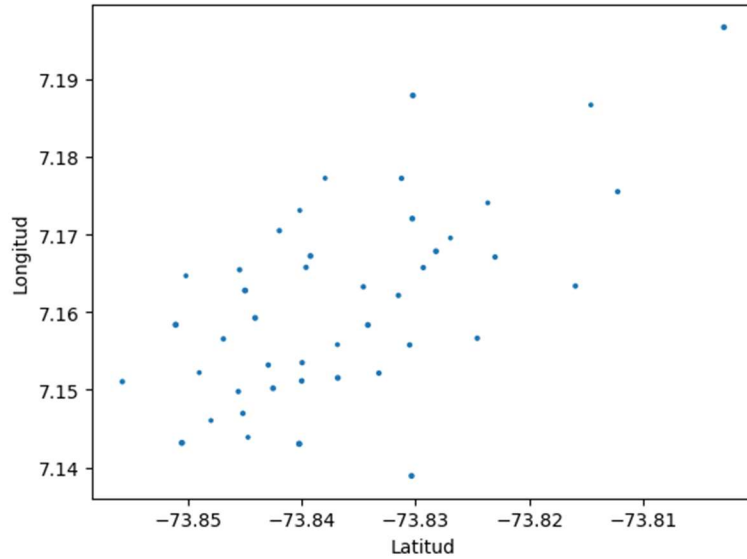


Figura 26

Representación de la localización del nuevo punto de almacenamiento.

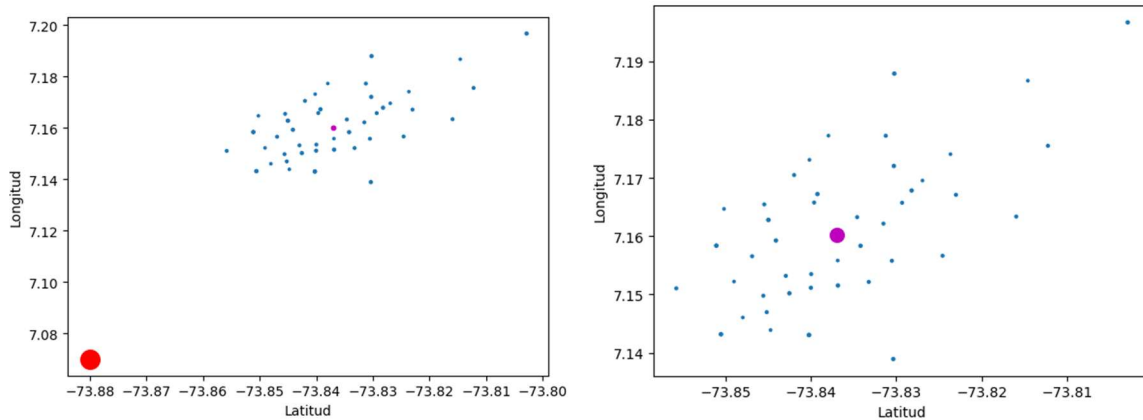


Figura 27

Matriz origen destino de los nodos del caso de estudio.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	0.0	1.4	1.4	1.8	1.8	0.8	0.8	2.2	2.2	1.0	1.0	3.5	1.6	1.6	1.8	0.9	1.2	0.7	0.6	1.8	2.1	0.8	0.4	1.5	1.3	2.9	0.3	1.4	1.4	1.7	2.8	1.4	0.9	0.9	2.1	1.0	0.7	5.0	1.4	1.3	2.2	1.1	1.9	1.2	1.8	0.4	0.7	0.9	0.6	1.1
2	1.4	0.0	0.0	1.9	1.9	0.8	0.8	1.5	1.5	1.3	1.3	4.6	2.9	1.3	1.6	1.0	2.5	0.7	2.0	1.3	0.9	2.1	1.7	0.7	2.7	4.2	1.7	2.5	0.6	2.3	3.6	1.0	1.9	2.3	3.6	0.9	1.5	6.2	2.7	1.8	2.8	0.5	3.2	1.2	2.7	1.4	1.2	1.6	1.4	1.5
3	1.4	0.0	0.0	1.9	1.9	0.8	0.8	1.5	1.5	1.3	1.3	4.6	2.9	1.3	1.6	1.0	2.5	0.7	2.0	1.3	0.9	2.1	1.7	0.7	2.7	4.2	1.7	2.5	0.6	2.3	3.6	1.0	1.9	2.3	3.6	0.9	1.5	6.2	2.7	1.8	2.8	0.5	3.2	1.2	2.7	1.4	1.2	1.6	1.4	1.5
4	1.8	1.9	1.9	0.0	0.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.8	0.8	5.1	3.0	0.6	0.5	1.1	2.8	1.7	2.1	0.8	1.8	1.6	2.1	1.3	2.1	4.3	1.6	3.1	2.4	3.4	4.6	0.9	1.1	2.5	3.2	2.3	2.4	6.5	3.0	3.0	1.1	1.5	3.5	0.8	3.5	1.3	1.0	0.9	2.3	2.8
5	1.8	1.9	1.9	0.0	0.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.8	0.8	5.1	3.0	0.6	0.5	1.1	2.8	1.7	2.1	0.8	1.8	1.6	2.1	1.3	2.1	4.3	1.6	3.1	2.4	3.4	4.6	0.9	1.1	2.5	3.2	2.3	2.4	6.5	3.0	3.0	1.1	1.5	3.5	0.8	3.5	1.3	1.0	0.9	2.3	2.8
6	0.8	0.8	0.8	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	1.3	1.3	3.9	2.2	1.6	1.9	1.0	1.8	0.4	1.4	1.7	1.6	1.6	1.0	1.1	2.1	3.5	1.2	1.7	0.6	1.6	2.9	1.3	1.6	1.6	2.9	0.3	0.7	5.4	1.9	1.1	2.8	0.7	2.4	1.3	2.0	1.1	1.1	1.4	0.6	0.8
7	0.8	0.8	0.8	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	1.3	1.3	3.9	2.2	1.6	1.9	1.0	1.8	0.4	1.4	1.7	1.6	1.6	1.0	1.1	2.1	3.5	1.2	1.7	0.6	1.6	2.9	1.3	1.6	1.6	2.9	0.3	0.7	5.4	1.9	1.1	2.8	0.7	2.4	1.3	2.0	1.1	1.1	1.4	0.6	0.8
8	2.2	1.5	1.5	1.0	1.0	2.0	2.0	0.0	0.0	1.3	1.3	5.6	3.7	0.7	0.6	1.3	3.3	1.7	2.7	0.4	0.9	2.4	2.6	0.9	2.9	5.0	2.2	3.5	2.2	3.6	4.9	0.8	2.0	3.1	4.0	2.3	2.7	7.2	3.5	3.2	2.1	1.4	4.1	1.1	3.9	1.9	1.5	1.6	2.5	2.9
9	2.2	1.5	1.5	1.0	1.0	2.0	2.0	0.0	0.0	1.3	1.3	5.6	3.7	0.7	0.6	1.3	3.3	1.7	2.7	0.4	0.9	2.4	2.6	0.9	2.9	5.0	2.2	3.5	2.2	3.6	4.9	0.8	2.0	3.1	4.0	2.3	2.7	7.2	3.5	3.2	2.1	1.4	4.1	1.1	3.9	1.9	1.5	1.6	2.5	2.9
10	1.0	1.3	1.3	0.8	0.8	1.3	1.3	1.3	0.0	0.0	4.4	2.3	0.7	0.9	0.4	2.0	0.9	1.4	0.9	1.6	1.1	1.3	0.9	1.6	3.7	0.9	2.3	1.7	2.5	3.8	0.6	0.7	1.8	2.7	1.5	1.6	5.9	2.3	2.2	1.6	0.9	2.8	0.3	2.8	0.6	0.2	0.3	1.5	1.9	
11	1.0	1.3	1.3	0.8	0.8	1.3	1.3	1.3	0.0	0.0	4.4	2.3	0.7	0.9	0.4	2.0	0.9	1.4	0.9	1.6	1.1	1.3	0.9	1.6	3.7	0.9	2.3	1.7	2.5	3.8	0.6	0.7	1.8	2.7	1.5	1.6	5.9	2.3	2.2	1.6	0.9	2.8	0.3	2.8	0.6	0.2	0.3	1.5	1.9	
12	3.5	4.6	4.6	5.1	5.1	3.9	3.9	5.6	5.6	4.4	4.4	0.0	2.1	5.0	5.2	4.4	2.3	4.0	3.0	5.3	5.5	3.5	3.1	4.9	3.2	1.1	3.4	2.1	4.2	2.5	1.8	4.8	3.9	2.6	2.3	3.8	3.1	1.5	2.1	2.9	5.0	4.4	1.6	4.6	1.9	3.8	4.2	4.2	3.3	3.2
13	3.5	4.6	4.6	5.1	5.1	3.9	3.9	5.6	5.6	4.4	4.4	0.0	2.1	5.0	5.2	4.4	2.3	4.0	3.0	5.3	5.5	3.5	3.1	4.9	3.2	1.1	3.4	2.1	4.2	2.5	1.8	4.8	3.9	2.6	2.3	3.8	3.1	1.5	2.1	2.9	5.0	4.4	1.6	4.6	1.9	3.8	4.2	4.2	3.3	3.2
14	1.6	1.9	2.9	3.0	2.0	2.2	2.2	3.7	3.7	2.3	2.3	2.1	0.6	3.0	3.2	2.4	2.5	2.3	1.0	3.3	3.7	1.4	1.2	3.0	1.1	1.4	1.4	0.9	2.7	1.8	2.2	2.8	1.8	0.6	0.8	2.3	1.6	3.6	0.5	1.8	2.9	2.6	0.7	2.6	1.3	2.2	2.1	1.7	1.9	
15	1.6	1.9	2.9	3.0	2.0	2.2	2.2	3.7	3.7	2.3	2.3	2.1	0.6	3.0	3.2	2.4	2.5	2.3	1.0	3.3	3.7	1.4	1.2	3.0	1.1	1.4	1.4	0.9	2.7	1.8	2.2	2.8	1.8	0.6	0.8	2.3	1.6	3.6	0.5	1.8	2.9	2.6	0.7	2.6	1.3	2.2	2.1	1.7	1.9	
16	1.3	1.3	0.6	0.6	1.6	1.6	0.7	0.7	0.7	5.0	3.0	0.0	0.3	0.7	0.7	2.7	1.2	2.0	2.3	1.1	1.7	1.9	0.7	2.3	4.4	1.6	2.9	2.8	3.1	4.4	0.3	1.3	2.5	3.4	1.9	2.1	6.5	2.9	2.7	1.7	1.0	3.5	0.4	1.2	0.8	1.0	2.0	2.4		
17	1.2	2.5	2.5	2.8	2.8	1.8	1.8	3.3	3.3	2.0	2.3	0.5	2.7	2.9	2.1	0.0	1.8	0.7	2.9	3.2	1.2	0.8	2.6	1.2	1.8	1.1	0.5	2.2	1.4	2.0	2.5	1.6	0.2	1.3	1.7	1.1	3.8	0.2	1.3	2.9	2.2	0.8	2.3	2.0	1.5	1.9	1.8	1.2	1.4	
18	0.7	0.7	0.7	1.7	1.7	0.4	0.4	1.7	1.7	0.9	0.9	4.0	2.3	1.2	1.5	0.6	1.8	0.0	1.3	1.4	1.4	1.4	1.0	0.9	2.0	3.6	1.0	1.9	0.8	1.9	3.2	1.0	1.3	1.6	2.8	0.6	0.9	5.6	2.0	1.4	2.5	0.4	2.5	0.9	2.2	0.8	0.7	1.1	0.8	
19	0.6	2.0	2.0	2.1	2.1	1.4	1.4	2.7	2.7	1.4	1.4	3.0	1.0	2.0	2.3	1.5	0.7	1.3	0.0	2.3	2.7	0.6	0.3	2.0	0.9	2.3	0.5	1.0	1.9	1.6	2.6	1.9	1.0	0.4	1.6	1.4	0.9	4.5	0.9	1.4	2.3	1.6	1.4	1.6	1.5	0.8	1.2	1.2	0.9	1.3
20	1.3	1.3	0.8	0.8	1.7	1.7	0.4	0.4	0.9	0.9	5.3	3.3	0.3	0.4	0.9	2.9	1.4	2.3	0.0	0.9	2.0	2.2	0.6	2.6	4.6	1.8	3.1	1.9	3.3	4.5	0.4	1.6	2.7	3.6	2.0	3.3	6.8	3.2	2.8	1.9	1.1	3.7	0.7	3.5	1.5	1.1	1.2	2.1	2.5	
21	0.9	0.9	1.8	1.8	1.6	1.6	0.9	0.9	1.6	1.6	5.5	3.7	1.1	1.3	1.3	3.2	1.4	2.7	0.9	0.0	2.6	2.4	0.7	3.2	5.0	2.3	3.3	1.5	2.3	3.2	1.6	1.0	2.3	3.0	4.2	1.8	2.3	7.0	3.4	2.7	2.8	1.0	4.0	1.3	3.6	2.0	1.6	1.9	2.2	2.4
22	0.8	2.1	2.1	1.6	1.6	1.6	1.6	2.4	2.4	1.1	1.1	3.5	1.4	1.7	1.9	1.3	1.2	1.4	0.6	2.0	2.6	0.0	0.9	1.9	0.6	2.7	0.4	1.6	2.2	3.2	1.6	0.5	1.0	1.6	1.8	1.4	4.9	1.4	2.0	1.7	1.6	2.0	1.3	2.1	0.6	1.0	0.8	1.4	1.9	
23	0.4	1.7	1.7	2.1	2.1	1.0	1.0	2.6	2.6	1.3	1.3	1.3	1.2	1.9	2.2	1.3	0.8	1.0	0.3	2.2	2.4	0.9	0.0	1.8	1.2	2.6	0.5	1.0	1.6	1.4	2.5	1.7	1.1	0.6	1.9	1.1	0.6	4.6	1.0	1.1	2.5	1.4	1.5	1.5	1.4	0.8	1.1	1.2	0.6	1.0
24	1.5	0.7	0.7	1.3	1.3	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	4.9	3.0	0.7	0.9	0.6	2.6	0.9	2.0	0.6	0.7	1.9	0.0	2.5	4.4	1.6	2.7	1.3	2.7	4.0	0.4	1.6	2.4	3.5	1.4	1.8	6.4	2.8	2.3	0.5	3.4	0.7	3.1	1.3	0.9	1.2	1.7	2.0	1.7	2.0	
25	1.3	2.7	2.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.9	2.9	1.6	1.6	3.2	1.1	2.3	2.4	1.9	1.2	2.0	0.9	2.6	3.2	0.6	2.3	1.0	1.6	2.7	2.5	3.2	2.2	1.0	1.0	1.1	2.3	1.8	4.6	1.3	2.3	1.9	2.2	1.7	1.9	2.2	1.2	1.6	1.3	1.8	2.2			
26	2.9	4.2	4.2	4.3	4.3	3.5	3.5	5.0	5.0	3.7	3.7	1.1	1.4	4.4	4.5	3.8	1.8	3.6	2.3	4.6	5.0	2.7	2.6	4.4	2.3	0.0	2.8	1.8	4.0	2.6	2.2	4.2	3.1	2.0	1.3	3.5	2.8	2.3	1.6	2.8	4.1	4.0	1.2	4.0	1.9	3.2	3.5	3.4	2.9	3.0
27	0.3	1.7	1.7	1.6	1.6	1.2	1.2	2.2	2.2	0.9	0.9	3.4	1.4	1.6	1.8	1.0	1.1	1.0	0.5	1.8	2.3	0.4	0.5	1.6	1.0	2.8	0.0	1.4	1.7	1.9	3.0	1.4	0.6	0.9	1.9	1.3	1.0	5.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.9	1.2	1.9	0.4	0.8	0.7	0.9	1.4
28	1.4	2.5	2.5	3.1	3.1	1.7	1.7	3.5	3.5	2.3	2.3	2.1	0.8	2.9	3.2	2.3	0.5	1.9	1.0	3.1	3.3	1.6	1.0	2.7	1.6	1.8	1.4	0.0	2.1	0.8	1.6	2.7	2.0	0.6	1.7	1.7	1.0	3.7	0.4	1.0	3.3	2.3	0.7	2.5	0.5	1.8	2.1	2.2	1.1	1.2
29	1.4	0.6	0.6	2.4	2.4	0.6	0.6	2.2	2.2	1.7	1.7	4.2	2.7	1.8	2.2	1.4	2.2	0.8	1.9	1.9	1.5	2.2	1.6	1.3	2.7	4.0	1.7	2.1	0.0	1.5	3.1	1.6	2.1	2.1	3															

11, 10, 16, 47, 48, 33, 1], 4: [1, 28, 39, 17, 34, 25, 22, 27, 46, 2, 29, 1], 5: [1, 6, 7, 36, 50, 37, 49, 18, 42, 19, 1], 6: [1, 23, 1]}

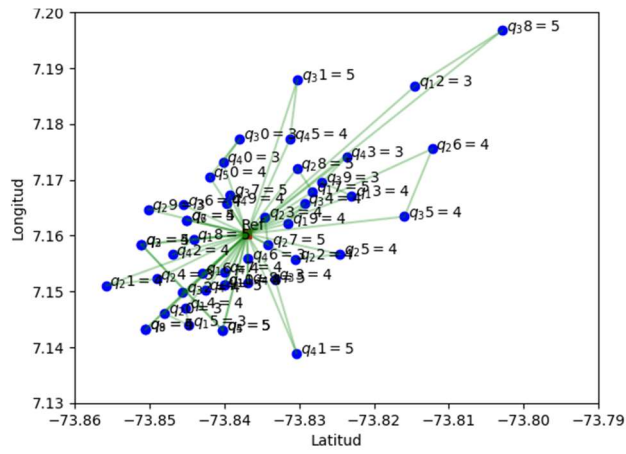
Tabla 21

Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú

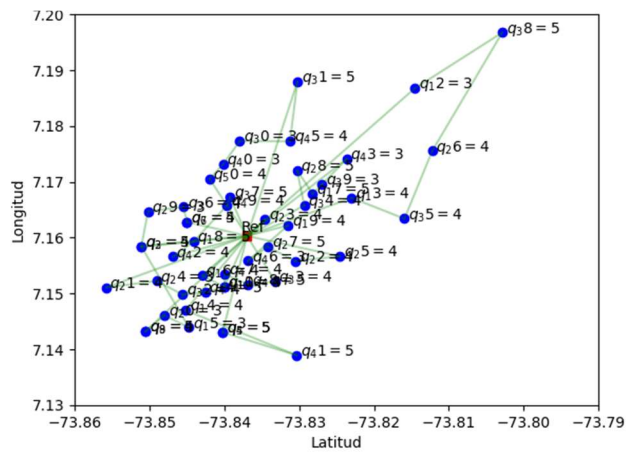
Capacidad	Condición	Rutas
10 ton	Iteración	{1: [1, 38, 12, 1], 2: [1, 8, 9, 1], 3: [1, 26, 35, 1], 4: [1, 3, 4, 1], 5: [1, 45, 31, 1], 6: [1, 15, 14, 20, 1], 7: [1, 5, 2, 1], 8: [1, 24, 21, 1], 9: [1, 39, 13, 43, 1], 10: [1, 30, 50, 40, 1], 11: [1, 44, 32, 1], 12: [1, 28, 17, 1], 13: [1, 10, 11, 1], 14: [1, 29, 36, 1], 15: [1, 7, 6, 1], 16: [1, 41, 33, 1], 17: [1, 16, 47, 1], 18: [1, 18, 42, 1], 19: [1, 22, 25, 1], 20: [1, 49, 37, 1], 21: [1, 34, 19, 1], 22: [1, 46, 48, 1], 23: [1, 27, 23, 1]}
	Mejor	{1: [1, 12, 38, 1], 2: [1, 9, 8, 1], 3: [1, 35, 26, 1], 4: [1, 4, 3, 1], 5: [1, 31, 45, 1], 6: [1, 15, 20, 14, 1], 7: [1, 2, 5, 1], 8: [1, 21, 24, 1], 9: [1, 39, 43, 13, 1], 10: [1, 30, 40, 50, 1], 11: [1, 32, 44, 1], 12: [1, 17, 28, 1], 13: [1, 11, 10, 1], 14: [1, 36, 29, 1], 15: [1, 6, 7, 1], 16: [1, 33, 41, 1], 17: [1, 47, 16, 1], 18: [1, 42, 18, 1], 19: [1, 25, 22, 1], 20: [1, 37, 49, 1], 21: [1, 19, 34, 1], 22: [1, 48, 46, 1], 23: [1, 23, 27, 1]}
20 ton	Iteración	{1: [1, 35, 26, 38, 12, 13, 1], 2: [1, 20, 9, 8, 15, 3, 1], 3: [1, 50, 40, 30, 45, 31, 1], 4: [1, 5, 41, 14, 4, 1], 5: [1, 44, 24, 21, 32, 11, 1], 6: [1, 17, 28, 43, 39, 34, 1], 7: [1, 6, 2, 29, 36, 7, 1], 8: [1, 10, 16, 47, 33, 48, 1], 9: [1, 37, 49, 18, 42, 1], 10: [1, 27, 46, 19, 25, 22, 1], 11: [1, 23, 1]}
	Mejor	{1: [1, 12, 38, 26, 35, 13, 1], 2: [1, 20, 8, 9, 15, 3, 1], 3: [1, 50, 40, 30, 31, 45, 1], 4: [1, 5, 4, 41, 14, 1], 5: [1, 21, 24, 32, 44, 11, 1], 6: [1, 28, 43, 39, 17, 34, 1], 7: [1, 2, 29, 36, 7, 6, 1], 8: [1, 47, 16, 10, 48, 33, 1], 9: [1, 42, 18, 49, 37, 1], 10: [1, 46, 27, 22, 25, 19, 1], 11: [1, 23, 1]}
40 ton	Iteración	{1: [1, 35, 26, 12, 38, 31, 43, 13, 45, 30, 40, 1], 2: [1, 8, 9, 20, 15, 3, 5, 41, 4, 14, 1], 3: [1, 24, 21, 32, 44, 16, 47, 10, 11, 48, 33, 1], 4: [1, 34, 17, 39, 28, 25, 22, 27, 46, 2, 29, 1], 5: [1, 6, 7, 36, 49, 37, 50, 42, 18, 19, 1], 6: [1, 23, 1]}
	Mejor	{1: [1, 35, 26, 38, 12, 31, 43, 13, 45, 30, 40, 1], 2: [1, 20, 8, 9, 15, 3, 5, 4, 41, 14, 1], 3: [1, 21, 24, 32, 44, 11, 10, 16, 47, 48, 33, 1], 4: [1, 28, 39, 17, 34, 25, 22, 27, 46, 2, 29, 1], 5: [1, 6, 7, 36, 50, 37, 49, 18, 42, 19, 1], 6: [1, 23, 1]}

Figura 28

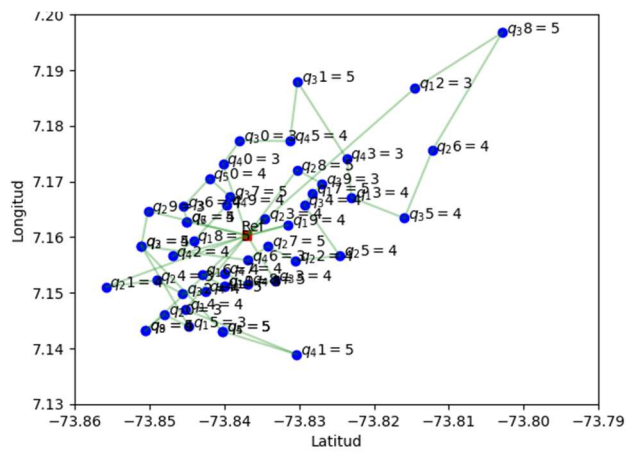
Rutas encontradas mediante el algoritmo de ahorros para a) 10 Ton, b) 20 Ton y c) 40 Ton .



(a)



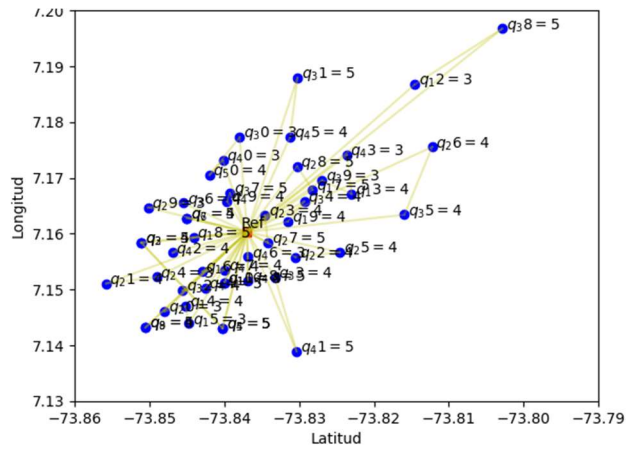
(b)



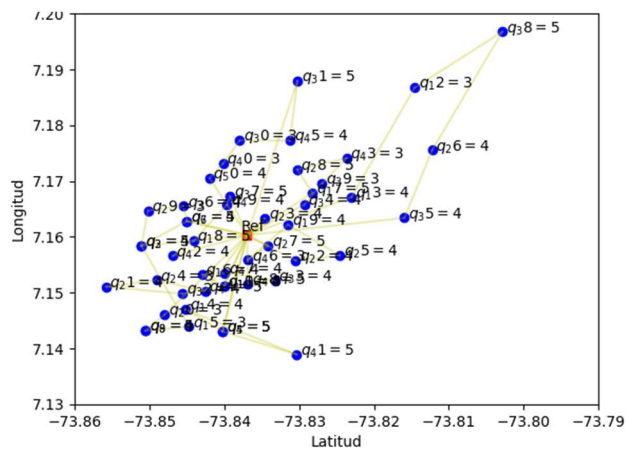
(c)

Figura 29

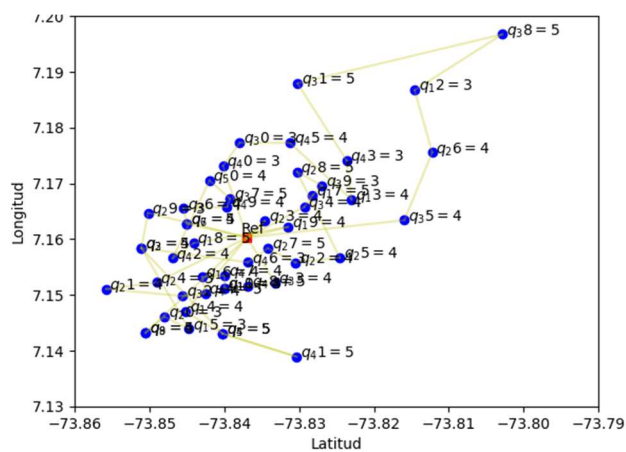
Rutas encontradas mediante el algoritmo de búsqueda tabú para a) 10 Ton, b) 20 Ton y c) 40 Ton



(a)



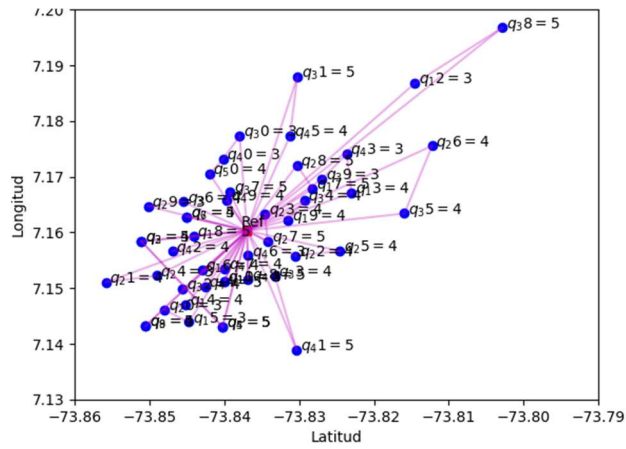
(b)



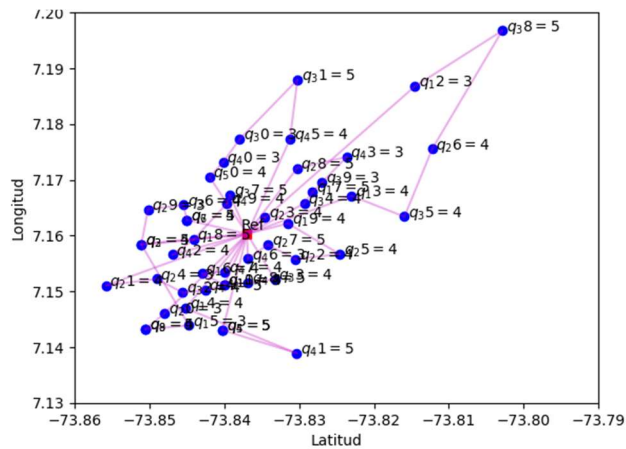
(c)

Figura 30

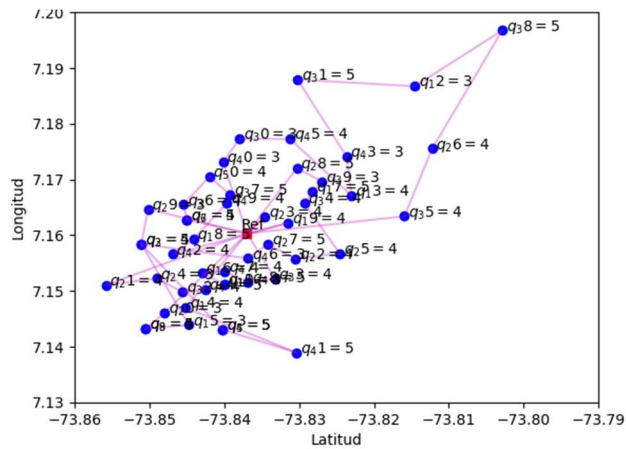
Mejores rutas encontradas con el algoritmo búsqueda tabú para a)10 Ton, b)20 Ton y c)40 Ton .



(a)



(b)



(c)

Tabla 22*Comparación entre los valores obtenidos por los diferentes métodos empleados*

Escenario	Heurística	Metaheurística Iteración	%	Metaheurística Mejor tiempo	%
10 Ton	2.7400	2.8900	5.47%	2.7267	-0.49%
20 Ton	1.8267	1.8533	1.46%	1.7500	-4.20%
40 Ton	1.5233	1.5367	0.88%	1.5133	-0.66%

5.4. Comparación en los tiempos de transporte de los diferentes escenarios

Una vez obtenido los tiempos para cada uno de los escenarios, a través de la consideración de un almacenamiento en el punto de emisión y un almacenamiento intermedio en el campo, se logró obtener un resumen de los datos más importantes como se plasma en la **Tabla 23**. Como se observa, se evidencia una reducción significativa de los tiempos generados al momento de poder tener en cuenta el trazado de las rutas desde un punto dentro del activo petrolero. Estas disminuciones superaron el 60% alcanzando valores de hasta 84% respecto al punto de almacenamiento ubicado en la fuente de emisión. De igual manera, fue posible observar que el escenario del uso de vehículos de 10 y 20 Ton, se obtuvo una reducción en la cantidad de rutas generadas logrando un 4 y 8% respectivamente.

Con esta información, la aplicación de un punto intermedio de almacenamiento en el campo petrolero permite generar una reducción significativa de los valores obtenidos en los tiempos de distribución del gas. Eso indica que el sistema de transporte en este caso de estudio permite generar una mejora considerable conforme se estudie la posibilidad de la instalación de un punto intermedio de almacenamiento en la cadena de suministro.

Tabla 23*Comparación entre los dos puntos de almacenamiento del gas*

Parámetros		Escenario		
Capacidad		10 Ton	20 Ton	40 Ton
Refinería	Rutas	24	12	6
	Heurística	16.59	8.78	4.91
	Metaheurística Iteración	16.75	8.77	4.87
	Metaheurística Mejor	16.59	8.55	4.77
Centroide	Rutas	23	11	6
	Heurística	2.74	1.83	1.52
	Metaheurística Iteración	2.89	1.85	1.54
	Metaheurística Mejor	2.73	1.75	1.51
Mejoras cantidad	Rutas	1.00	1.00	0.00
	Heurística	13.85	6.96	3.39
	Metaheurística Iteración	13.86	6.92	3.33
	Metaheurística Mejor	13.86	6.80	3.26
Mejoras Porcentual	Rutas	4%	8%	0%
	Heurística	83%	79%	69%
	Metaheurística Iteración	83%	79%	68%
	Metaheurística Mejor	84%	80%	68%

6. Conclusiones

Como resultado de la presente investigación fue posible concluir lo siguiente:

Considerar una localización de almacenamiento dentro de los límites del activo petrolero permitió generar una considerable reducción en los tiempos requeridos para la distribución del gas a los diferentes nodos, con valores de hasta 84%. De igual manera, fue posible generar una reducción en la cantidad de rutas generadas mediante los algoritmos empleados para el análisis del caso de estudio.

El algoritmo generado basado en la metaheurística mostró ser un apoyo en la mejora de los tiempos de transporte de los casos evaluados, con disminuciones cercanas al 5%. A su vez, como resultado de la validación del modelo, se pudo observar que las diferencias entre la solución óptima y el valor del algoritmo difirió en un 2.5% de su valor, permitiendo asegurar su validez.

La aplicación de técnicas de optimización en los procesos de ruteo de vehículos permite analizar las diferentes opciones que puede tener un problema determinado, al poder considerar de manera conceptual las restricciones, parámetros y fijar una función objetivo conforme los datos recolectados en la búsqueda de la representación del modelo.

El uso de vehículos en los proyectos piloto de CCUS permiten obtener una flexibilidad que una red de tuberías no lograría. Esta característica es de gran importancia en las primeras etapas ya que permite realizar la distribución del gas a los puntos de almacenamiento con una baja inversión inicial y a su vez genera una serie de rutas las cuales pueden ser modificadas conforme la capacidad o demanda que se tiene en un momento determinado.

7. Recomendaciones

Con el objetivo de poder mejorar los resultados obtenidos en la presente investigación, se recomienda:

Estudiar el problema de asignación de ruteo de vehículos en un escenario de distribución de CO₂ considerando que, al generar un aumento en la demanda de este gas por pozo, la infraestructura actual para el transporte del gas no permitiría realizar una ruta debido a la capacidad limitada del vehículo para realizar el proceso.

Analizar otras técnicas heurísticas que permitan obtener la solución inicial la cual será empleada en la técnica metaheurística para la optimización en los tiempos de las rutas planteadas. De igual manera, considerar nuevas técnicas metaheurísticas que permitan generar rutas intercambiando nodos no solo en la misma ruta sino entre ellas.

Considerar el proceso de distribución del dióxido de carbono como un proyecto de transporte multimodal, que permita la integración de los otros métodos de transporte en la zona, como lo es el fluvial y el ferroviario, pero que debido a su baja flexibilidad no fue posible contemplar para un acercamiento inicial en el proyecto.

Referencias Bibliográficas

- Al Baroudi, H., Wada, R., Ozaki, M., Patchigolla, K., Iwatomi, M., Murayama, K., & Otaki, T. (2022). Real-scale investigation of liquid CO₂ discharge from the emergency release coupler of a marine loading arm. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103674>
- Anantharaman, R., Jordal, K., Roussanaly, S., Fu, C., Eilif Wahl, P., Brakstad, E., Riboldi, L., Gilardi, C., Clapis, A., Mancuso, L., Castellano, M., Gale, J., & Valdenaire, D. (2018). Understanding the cost of retrofitting CO₂ capture to an integrated oil refinery. *14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14*, 1-6.
- Azar, C., Lindgren, K., Larson, E., & Möllersten, K. (2006). Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass - Costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Climatic Change*, 74(1-3), 47-79. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-3484-7>
- Balza Franco, V., Mercado Cervera, H., & Henríquez Fuentes, G. (2020). *Cadenas de suministro, logística y prácticas colaborativas en el Caribe colombiano*. Ediciones Unimagdalena. <https://www.digitaliapublishing.com/a/111430>
- Becattini, V., Gabrielli, P., Antonini, C., Campos, J., Acquilino, A., Sansavini, G., & Mazzotti, M. (2022). Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>

- Bielicki, J. M. (2009). Spatial clustering and carbon capture and storage deployment. *Energy Procedia*, 1(1), 1691-1698. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.221>
- Bjerketvedt, V. S., Tomasgaard, A., & Roussanaly, S. (2020). Optimal design and cost of ship-based CO2 transport under uncertainties and fluctuations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103190>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. En *Computers and Industrial Engineering* (Vol. 99, pp. 300-313). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Cao, Q., Yan, X., Yu, S., Yu, J., Chen, S., Zhang, Y., & Guo, X. (2021). Experimental Investigation of the Characteristics of Supercritical CO2 during the Venting Process. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103424>
- Carr, T. R., Iqbal, A., Callaghan, N., Dana-Adkins-Heljeson, Look, K., Saving, S., & Nelson, K. (2009). A national look at carbon capture and storage-National carbon sequestration database and geographical information system (NatCarb). *Energy Procedia*, 1(1), 2841-2847. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.057>
- Castellanos Ramírez, A. (2009). *Manual de gestión logística y del transporte y distribución de mercancías*. Universidad del Norte. <https://www.digitaliapublishing.com/a/9192>
- Castro, R., Maya, G., Mercado, D., Trujillo, M., Soto, C., Pérez, H., & Lobo, A. (2010). *Enhanced Oil Recovery (EOR) Status - Colombia*.
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568-581. <http://www.jstor.org/stable/167703>

- Cruz Chavez, M. A., Moreno Bernal, P., & Peralta Abarca, J. del C. (2014). Aplicación de la teoría de la complejidad en optimización combinatoria. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 10(20), 35-42.
- de Coninck, H., Flach, T., Curnow, P., Richardson, P., Anderson, J., Shackley, S., Sigurthorsson, G., & Reiner, D. (2009). The acceptability of CO2 capture and storage (CCS) in Europe: An assessment of the key determining factors. Part 1. Scientific, technical and economic dimensions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(3), 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.009>
- Desideri, U., Arcioni, L., & Tozzi, M. (2008). Feasibility study for a carbon capture and storage project in northern Italy. *International Journal of Energy Research*, 32(12), 1175-1183. <https://doi.org/10.1002/er.1454>
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. En *Computers and Industrial Engineering* (Vol. 57, Número 4, pp. 1472-1483). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>
- Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers and Industrial Engineering*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106242>
- Fleten, S. E., Lien, K., Ljønes, K., Pagès-Bernaus, A., & Aaberg, M. (2010). Value chains for carbon storage and enhanced oil recovery: Optimal investment under uncertainty. *Energy Systems*, 1(4), 457-470. <https://doi.org/10.1007/s12667-010-0019-0>
- Gallo, A., Pereira, E. G., Fossa, A., Hylton-Edwards, H., Muinzer, T., Dos Santo, E. M., Dybwad, C., & Liaw, C. (2021). Towards the International Standardization of Carbon Dioxide Capture, Transportation, Utilization and Storage (CCUS) Technologies:

- Current Challenges and Future Directions. *Journal of Sustainable Development Law and Policy (The)*, 12(2), 157-189. <https://doi.org/10.4314/jsdlp.v12i2.2>
- García Arbeláez, C., Vallejo López, G., Higgins, M. Lou, & Escobar, E. M. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*. www.wwf.org.co
- Garg, D., Luthra, S., & Mangla, S. (2021). Logistics Management. En *Supply Chain and Logistics Management* (pp. 104-121). New Academic Science.
- Global CCS Institute. (2023). *UNDERSTANDING CCS Storage*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport.pdf
- Glover, F., & Laguna, M. (1998). Tabu Search. En *Handbook of Combinatorial Optimization*. Springer Science & Business Media.
- Glover, F., & Melián, B. (2003). Búsqueda Tabú. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 19, 29-48. <http://www.aepia.org/revista>
- Godec, M., Kuuskraa, V., Van Leeuwen, T., Melzer, L. S., & Wildgust, N. (2011). CO2 storage in depleted oil fields: The worldwide potential for carbon dioxide enhanced oil recovery. *Energy Procedia*, 4, 2162-2169. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.102>
- Gola, S., & Noussia, K. (2022). From CO2 sources to sinks: Regulatory challenges for trans-boundary trade, shipment and storage. *Resources, Conservation and Recycling*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106039>
- Gong, W., Remiezowicz, E., Fosbøl, P. L., & von Solms, N. (2022). Design and Analysis of Novel CO2 Conditioning Process in Ship-Based CCS. *Energies*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/en15165928>
- Grant, T., Guinan, A., Shih, C. Y., Lin, S. M., Vikara, D., Morgan, D., & Remson, D. (2018). Comparative analysis of transport and storage options from a CO2 source perspective.

- International Journal of Greenhouse Gas Control*, 72, 175-191.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.03.012>
- Hammer, M., Deng, H., Liu, L., Langsholt, M., & Munkejord, S. T. (2021). Upward and downward two-phase flow of CO₂ in a pipe: Comparison between experimental data and model predictions. *International Journal of Multiphase Flow*, 138.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103590>
- Haugen, H. A., Eldrup, N., Bernstone, C., Liljemark, S., Pettersson, H., Noer, M., Holland, J., Nilsson, P. A., Hegerland, G., & Pande, J. O. (2009). Options for transporting CO₂ from coal fired power plants Case Denmark. *Energy Procedia*, 1(1), 1665-1672.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.218>
- Heffron, R. J., Downes, L., Bysveen, M., Brakstad, E. V., Mikunda, T., Neele, F., Eickhoff, C., Hanstock, D., & Schumann, D. (2018a). Ownership, risk and the law for a CO₂ transport network for carbon capture and storage in the European Union. *Journal of Energy and Natural Resources Law*, 36(4), 433-462.
<https://doi.org/10.1080/02646811.2018.1442215>
- Heffron, R. J., Downes, L., Bysveen, M., Brakstad, E. V., Mikunda, T., Neele, F., Eickhoff, C., Hanstock, D., & Schumann, D. (2018b). Three layers of energy law for examining CO₂ transport for carbon-capture and storage. *Journal of World Energy Law and Business*, 11(2), 93-115. <https://doi.org/10.1093/jwelb/jwx035>
- Herzog, N., & Egbers, C. (2013). Atmospheric dispersion of CO₂ released from pipeline leakages. *Energy Procedia*, 40, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.027>

- Hong, W. Y. (2022). A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO2 emissions future. En *Carbon Capture Science and Technology* (Vol. 3). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100044>
- Jiang, K., & Ashworth, P. (2021). The development of Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110521>
- Joshi, P., Bikkina, P., & Wang, Q. (2016). Consequence analysis of accidental release of supercritical carbon dioxide from high pressure pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 55, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.10.010>
- Jung, J. Y., Huh, C., Kang, S. G., Seo, Y., & Chang, D. (2013a). CO2 transport strategy and its cost estimation for the offshore CCS in Korea. *Applied Energy*, 111, 1054-1060. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.055>
- Jung, J. Y., Huh, C., Kang, S. G., Seo, Y., & Chang, D. (2013b). CO2 transport strategy for the offshore CCS in Korea. *Energy Procedia*, 37, 3242-3249. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.211>
- Kjärstad, J., Skagestad, R., Eldrup, N. H., & Johnsson, F. (2016). Ship transport—A low cost and low risk CO2 transport option in the Nordic countries. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, 168-184. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.024>
- Knoope, M. M. J., Ramírez, A., & Faaij, A. P. C. (2015). Investing in CO2 transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 41, 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.07.013>

- Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P., & Kechagias, E. P. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. *Operational Research*, 22(3), 2033-2062. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. *Intelligent Information Management*, 04(03), 66-74. <https://doi.org/10.4236/iim.2012.43010>
- Lazic, T., Oko, E., & Wang, M. (2014). Case study on CO2 transport pipeline network design for Humber region in the UK. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 228(3), 210-225. <https://doi.org/10.1177/0954408913500447>
- Li, J., Cockerill, T., Liang, X., & Gibbins, J. (2011). Locating new coal-fired power plants with carbon capture ready design - A GIS case study of Guangdong Province in China. *Energy Procedia*, 4, 2824-2830. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.187>
- Liu, B., Liu, X., Lu, C., Godbole, A., Michal, G., & Tieu, A. K. (2017). Multi-phase decompression modeling of CO2 pipelines. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 7(4), 665-679. <https://doi.org/10.1002/ghg.1666>
- Lopes, J. T., Francesconi, A. Z., & Vianna, S. S. V. (2018). Modelling of source term from accidental release of pressurised CO2. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.046>
- Lotz, M., & Brent, A. C. (2008). A review of carbon dioxide capture and sequestration and the Kyoto Protocol's clean development mechanism and prospects for Southern Africa.

- Journal of Energy in Southern Africa*, 19(1), 13-24. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2008/v19i1a3315>
- Lu, H., Ma, X., Huang, K., Fu, L., & Azimi, M. (2020). Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994>
- Luhning, R. W., Glanzer, J. H., Noble, P., & Wang, H.-S. (2005). Pipeline Backbone for Carbon Dioxide for Enhanced Oil Recovery in Western Canada. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 44(8), 55-58. <https://doi.org/10.2118/05-08-02/2175024/petsoc-05-08-02.pdf>
- Lyons, C. J., Race, J. M., Wetenhall, B., Chang, E., Hopkins, H. F., & Barnett, J. (2019). Assessment of the Applicability of Failure Frequency Models for Dense Phase Carbon Dioxide Pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 87, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.014>
- Ma, Y., Xing, Y., Ong, M. C., & Hemmingsen, T. H. (2021). Baseline design of a subsea shuttle tanker system for liquid carbon dioxide transportation. *Ocean Engineering*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109891>
- Marine Technology Society, Oceanic Engineering Society, Annual IEEE Computer Conference, & Oceans MTS/IEEE Conference 2012.05.21-24 Yeosu. (s. f.). *Oceans, 2012 - Yeosu 21-24 May 2012, the Ocean Resort, Yeosu, Republic of Korea ; conference*.
- Mazzoldi, A., Hill, T., & Colls, J. J. (2008). CFD and Gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities. *Atmospheric Environment*, 42(34), 8046-8054. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.038>

- Mechleri, E., Brown, S., Fennell, P. S., & Mac Dowell, N. (2017). CO₂ capture and storage (CCS) cost reduction via infrastructure right-sizing. *Chemical Engineering Research and Design*, 119, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.016>
- MinAmbiente. (2021, agosto 9). “Colombia está comprometida con la acción climática global”: Ministro de Ambiente. <https://www.minambiente.gov.co/colombia-esta-comprometida-con-la-accion-climatica-global-ministro-de-ambiente/#:~:text=El%20pa%C3%ADs%20se%20comprometi%C3%B3%20a,ambientales%20m%C3%A1s%20ambiciosas%20del%20mundo>.
- Mohammadi, M., Hourfar, F., Elkamel, A., & Leonenko, Y. (2019). Economic Optimization Design of CO₂ Pipeline Transportation with Booster Stations. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(36), 16730-16742. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02348>
- Mojica, J., & Franco, R. (1990). Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Geología Colombiana*, 17, 41-64.
- Mora, L. A. (2014). *Logística del transporte y distribución de carga*. Ecoe Ediciones. <https://www.digitaliapublishing.com/a/48601>
- Motohashi, S., Ishino, M., Todaka, N., Hashimoto, S., & Sakaguchi, J. (2011). Engineering consideration of surface facilities for a candidate CCS demonstration project in Japan. *Energy Procedia*, 4, 5586-5593. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.547>
- Munkejord, S. T., Deng, H., Austegard, A., Hammer, M., Aasen, A., & Skarsvåg, H. L. (2021). Depressurization of CO₂-N₂ and CO₂-He in a pipe: Experiments and modelling of pressure and temperature dynamics. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103361>

- Nogueira, T., Rochedo, P. R. R., & Szklo, A. (2022). Evaluation of offshore CO2 transport alternatives in Brazil. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103629>
- Ogland-Hand, J. D., Cohen, S. M., Kammer, R. M., Ellett, K. M., Saar, M. O., Bennett, J. A., & Middleton, R. S. (2022). The Importance of Modeling Carbon Dioxide Transportation and Geologic Storage in Energy System Planning Tools. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.855105>
- Ozaki, M., Ohsumi, T., & Kajiyama, R. (2013). Ship-based offshore CCS featuring CO2 shuttle ships equipped with injection facilities. *Energy Procedia*, 37, 3184-3190. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.205>
- Raimondi, L. (2022). CCS Technology – CO2 Transportation and Relief Simulation in the Critical Region for HSE Assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 43-48. <https://doi.org/10.3303/CET2291008>
- Rocha Medina, L. B., González La Rota, E. C., & Orjuela Castro, J. A. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 16(2), 35-55.
- Roussanaly, S., Brunsvold, A. L., & Hognes, E. S. (2014). Benchmarking of CO2 transport technologies: Part II - Offshore pipeline and shipping to an offshore site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 283-299. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.06.019>
- Roussanaly, S., Deng, H., Skaugen, G., & Gundersen, T. (2021). At what pressure shall co2 be transported by ship? An in-depth cost comparison of 7 and 15 barg shipping. *Energies*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/en14185635>

- Roussanaly, S., Hognes, E. S., & Jakobsen, J. P. (2013). Multi-criteria analysis of two CO2 transport technologies. *Energy Procedia*, 37, 2981-2988. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.184>
- Roussanaly, S., Jakobsen, J. P., Hognes, E. H., & Brunsvold, A. L. (2013). Benchmarking of CO2 transport technologies: Part I-Onshore pipeline and shipping between two onshore areas. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 584-594. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.05.031>
- Serin, E. (2023). What technology do we need to cut carbon emissions? *The London School of Economics and Political Science*. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-technology-do-we-need-to-cut-carbon-emissions/>
- Shahirpour, A., Herzog, N., & Egbers, C. (2013). Towards CFD modeling of carbon dioxide turbulent pipe line transportation. *Energy Procedia*, 40, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.047>
- Sleiti, A. K., Al-Ammari, W. A., Vesely, L., & Kapat, J. S. (2022). Carbon Dioxide Transport Pipeline Systems: Overview of Technical Characteristics, Safety, Integrity and Cost, and Potential Application of Digital Twin. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 144(9). <https://doi.org/10.1115/1.4053348>
- Svensson, R., Odenberger, M., Johnsson, F., & Strömberg, L. (2004). Transportation systems for CO2 - Application to carbon capture and storage. *Energy Conversion and Management*, 45(15-16), 2343-2353. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.022>

- Teng, L., Liu, X., Li, X., Li, Y., & Lu, C. (2021). An approach of quantitative risk assessment for release of supercritical CO₂ pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104131>
- Tsimplis, M., & Noussia, K. (2022). The use of ships within a CCUS system: Regulation and liability. *Resources, Conservation and Recycling*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106218>
- Vasquez, H. (1994). La historia del petróleo en Colombia. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 99-109.
- Vélez, M. C., & Montoya, J. A. (2007). Methaeuristiccos: una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones. *Revista EIA*, 8, 99-115.
- Vitali, M., Corvaro, F., Marchetti, B., & Terenzi, A. (2022). Thermodynamic challenges for CO₂ pipelines design: A critical review on the effects of impurities, water content, and low temperature. En *International Journal of Greenhouse Gas Control* (Vol. 114). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103605>
- Wang, D., Zhang, Y. D., Adu, E., Yang, J. P., Shen, Q. W., Tian, L., & Wu, L. (2016). Influence of dense phase CO₂ pipeline transportation parameters. *International Journal of Heat and Technology*, 34(3), 479-484. <https://doi.org/10.18280/ijht.340318>
- Weber, V. (2021). Are we ready for the ship transport of CO₂ for CCS? Crude solutions from international and European law. *Review of European, Comparative and International Environmental Law*, 30(3), 387-395. <https://doi.org/10.1111/reel.12399>
- Weber, V., & Tsimplis, M. N. (2017). *The UK Liability Framework for the Transport of CO₂ for Offshore CCS Operations*. <http://www.sccc.org.uk/unfccc->

- Wellenstein, E., & Slagter, M. (2011). Strategies for CCS-chain development. A qualitative comparison of different infrastructure configurations. *Energy Procedia*, 4, 2778-2784. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.181>
- Wilkes, M. D., Mukherjee, S., & Brown, S. (2021). Linking CO₂ capture and pipeline transportation: sensitivity analysis and dynamic study of the compression train. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103449>
- Xing, Y., Ong, M. C., Hemmingsen, T., Ellingsen, K. E., & Reinås, L. (2021). Design considerations of a subsea shuttle tanker system for liquid carbon dioxide transportation. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 143(4). <https://doi.org/10.1115/1.4048926>
- Yáñez Angarita, E. E., Núñez-López, V., Ramírez Ramírez, A., Castillo Monroy, E., & Faaij, A. (2022). Rapid screening and probabilistic estimation of the potential for CO₂-EOR and associated geological CO₂ storage in Colombian petroleum basins. *Petroleum Geoscience*, 28(1), 1-22. <https://doi.org/10.1144/petgeo2020-110>
- Yáñez, É., Meerman, H., Ramírez, A., Castillo, É., & Faaij, A. (2022). Fully integrated CO₂ mitigation strategy for an existing refinery: A case study in Colombia. *Applied Energy*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118771>
- Yáñez, E., Ramírez, A., Núñez-López, V., Castillo, E., & Faaij, A. (2020). Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102938>

- Yao, J., Han, H., Yang, Y., Song, Y., & Li, G. (2023). A Review of Recent Progress of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in China. En *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 13, Número 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app13021169>
- Yoo, B. Y., Choi, D. K., Huh, C., Kang, S. G., & Kim, I. S. (2013). A feasibility study on CO₂ marine transport in South Korea. *Energy Procedia*, 37, 3199-3211. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.207>
- Yoo, B. Y., Choi, D. K., Kim, H. J., Moon, Y. S., Na, H. S., & Lee, S. G. (2013). Development of CO₂ terminal and CO₂ carrier for future commercialized CCS market. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.11.008>
- Zahid, U., An, J., Lee, C. J., Lee, U., & Han, C. (2015a). Design and operation strategy of CO₂ terminal. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54(8), 2353-2365. <https://doi.org/10.1021/ie503696x>
- Zahid, U., An, J., Lee, C.-J., Lee, U., & Han, C. (2015b). Design and operation strategy of CO₂ terminal. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54(8), 2353-2365. <https://doi.org/10.1021/ie503696x>
- Zahid, U., Kim, Y. H., Ahmed, U., & An, J. (2017). Conceptual design of an off-shore topside CO₂ injection system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 66, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.09.009>
- Zheng, W., Mahgerefteh, H., Jamois, D., Hebrard, J., & Proust, C. (2017). Modeling of Depressurization-Induced Superheating for Compressed Liquefied Gases. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(18), 5432-5442. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b00105>

