

**ANÁLISIS TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE RECOBRO PARA  
CAMPOS DE CRUDO PESADO Y EXTRA-PESADO CON MAYOR  
APLICABILIDAD EN COLOMBIA**

**MARIA FERNANDA RODRÍGUEZ RIVERA  
CRISTIAN ARTURO SUÁREZ SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**ANÁLISIS TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE RECOBRO PARA  
CAMPOS DE CRUDO PESADO Y EXTRA-PESADO CON MAYOR  
APLICABILIDAD EN COLOMBIA**

**MARIA FERNANDA RODRÍGUEZ RIVERA  
CRISTIAN ARTURO SUÁREZ SUÁREZ**

**TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TITULO DE INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**DIRECTOR:  
HARVING DÍAZ CONSUEGRA  
MSc. en Ingeniería de Petróleo y Gas con Énfasis en Gerencia**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO – QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

A Dios, primeramente, por la sabiduría, paciencia y entendimiento que me brindó en cada momento de la realización de este proyecto.

A mis padres Juan Carlos y María, quienes fueron apoyo incondicional en el transcurso de mi preparación como profesional y me dieron la oportunidad y confianza para cumplir uno de tantos propósitos que tengo.

A nuestro director Harving Díaz por ser un guía en este proceso, por el tiempo dedicado y las atenciones brindadas, por tener siempre una frase de apoyo en los momentos de preocupación.

A Cristian por confiar en que esta sería la mejor opción y seguirme la cuerda siempre.

A Andrés, mi compañero incondicional y esos amigos cercanos que siempre me sacaban una sonrisa y me llenaban de buena energía para continuar.

***Mafe***

Primero que nada, a Dios por ser mi guía, por iluminarme y por ayudarme a tomar las mejores decisiones durante el desarrollo de este proyecto.

A mis padres, Elber y Nieves por sus consejos, por su cariño, por sus valores, por su apoyo y entrega diaria para ayudarme a salir adelante.

A mis abuelos maternos Arturo y Teresa quienes me acogieron con su amor durante un largo tiempo y me apoyaron día tras día.

A mis abuelos paternos Alejandro y Uvaldina que, aunque se encuentran lejos me brindaron sus consejos y su motivación para no rendirme.

A mis hermanos Felipe y Anyelo por su interés y unión a pesar de los problemas.

A mi familia por su entrega, por sus consejos, por su motivación y unión.

A María Fernanda mi amiga y compañera de tesis por su apoyo, por su ayuda, por su paciencia y por su entrega durante cada semestre para la culminación de este camino por medio de este proyecto.

A la ingeniera Nancy Andrea Barajas Jurado, mi gran amiga quien hoy no se encuentra con nosotros por su buena energía, por su sinceridad, por su preocupación y por su apoyo incondicional.

A mis amig@s y compañer@s de la facultad con quienes compartí largas horas de estudio y grandes experiencias, personas con quienes espero seguir compartiendo y apoyando en este camino.

A mis amig@s y compañer@s que conocí en Málaga y con quienes comencé este camino.

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma aportaron su granito de arena para poder ayudarme a culminar este trabajo de la mejor manera posible.

***Cristian***

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer a las siguientes personas e instituciones por el apoyo recibido durante el desarrollo de este trabajo:

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por acogernos y brindarnos los espacios propicios para nuestra formación como personas y futuros ingenieros.

A la ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS, por los conceptos que nos dio a lo largo de este proceso y por los profesionales íntegros que hacen parte de ella, quienes estuvieron atentos a nuestras dudas e inquietudes y siempre dispuestos a ayudarnos.

Al ingeniero Harving Díaz Consuegra, director de este trabajo de grado, por su tiempo, entrega, dedicación y frases de reflexión.

A todas las personas y amigos cercanos que nos brindaron siempre voces de apoyo y ánimo y nos acompañaron en el camino.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	22
1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS .....	23
1.1 GRAVEDAD API .....	23
1.2 CUENCA SEDIMENTARIA .....	23
1.3 ANÁLISIS AMBIENTAL (EVALUACIÓN AMBIENTAL) .....	24
1.4 RECUPERACIÓN MEJORADA (EOR) .....	24
2. IDENTIFICACION DE LAS CUENCAS .....	25
2.1 CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES .....	26
2.1.1 Generalidades de la cuenca .....	27
2.1.2. Descripción natural de la cuenca de los Llanos Orientales.....	28
2.2 CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.....	30
2.2.1 Generalidades de la cuenca .....	31
2.2.2 Descripción natural de la cuenca del Valle Medio Magdalena .....	32
2.3 CUENCA DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA.....	34
2.3.1 Generalidades de la cuenca .....	35
2.3.2. Descripción natural de la cuenca del Valle Superior del Magdalena .....	36
2.4 CUENCA PUTUMAYO-CAGUÁN .....	38
2.4.1. Generalidades de la cuenca .....	38
2.4.2. Descripción natural de la cuenca Putumayo-Caguán .....	39
2.5 CUENCA CORDILLERA ORIENTAL .....	41
2.5.1 Generalidades de la cuenca .....	42
2.5.2 Descripción natural de la cuenca de la Cordillera Oriental.....	43
3. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE RECOBRO.....	46

3.1 INYECCIÓN DE AGUA CALIENTE .....	46
3.2 ASP (ALCALI-SURFACTANTE-POLIMERO) .....	47
3.3 INYECCIÓN DE POLÍMEROS.....	47
3.4 INYECCIÓN CONTINUA DE VAPOR .....	48
3.5 INYECCIÓN CÍCLICA DE VAPOR .....	49
3.6 SAGD (DRENAJE GRAVITACIONAL ASISTIDO POR VAPOR).....	50
3.7 VAPEX.....	51
3.8 NECESIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES PARA LOS METODOS DE RECOBRO.....	52
3.8.1 Recurso hídrico.....	52
3.8.2 Uso del suelo .....	53
3.9 GENERACION DE RESIDUOS .....	53
3.9.1 Residuos líquidos.....	53
3.9.2 Residuos sólidos.....	54
3.9.3 Emisiones atmosféricas .....	54
4. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LOS IMPACTOS.....	55
4.1 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES .....	55
4.1.1 Metodología de identificación de impactos ambientales .....	55
4.1.2 Metodología de calificación de impactos ambientales .....	56
4.1.2.1 Calificación semi-cuantitativa.....	56
4.2 MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES .....	59
4.2.1 Inyección de agua caliente.....	59
4.2.1.1 Análisis ambiental – Inyección de agua caliente.....	63
4.2.2 Inyección de ASP (Alcali-Polímero-Surfactante).....	64
4.2.2.1 Análisis ambiental-ASP (Alcali-Polímero-Surfactante).....	68
4.2.3 Inyección de polímeros .....	69
4.2.3.1 Análisis ambiental-Inyección de polímeros .....	73
4.2.4 Inyección continúa de vapor .....	74
4.2.4.1 Análisis ambiental-Inyección continúa de vapor .....	78

4.2.5 Inyección cíclica de vapor.....	78
4.2.5.1 Análisis ambiental – Inyección cíclica de vapor .....	82
4.2.6 SAGD (Drenaje Gravitacional Asistida por Vapor).....	83
4.2.6.1 Análisis ambiental – SAGD (Segregación Gravitacional Asistida por Vapor). .....	87
4.2.7 Vapex.....	88
4.2.7.1 Análisis ambiental – Vapex.....	93
4.3 RESULTADOS GENERALES DEL ANÁLISIS AMBIENTAL PARA LOS MÉTODOS DE RECOBRO.....	94
4.3.1 Conclusiones del análisis general de los métodos de recobro.....	95
5. SELECCIÓN DEL METODO DE RECOBRO MÁS APROPIADO AMBIENTALMENTE .....	97
6. CONCLUSIONES .....	101
7. RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación por °API del crudo.....	23
Tabla 2. Cuencas sedimentarias productoras en Colombia (2010). ....	25
Tabla 3. Generalidades de la cuenca Llanos Orientales.....	28
Tabla 4. Generalidades de la cuenca Valle Medio Magdalena .....	32
Tabla 5. Generalidades de la cuenca Valle Superior Magdalena .....	36
Tabla 6. Generalidades de la cuenca Putumayo – Caguán.....	39
Tabla 7. Generalidades de la cuenca Cordillera Oriental.....	43
Tabla 8. Rango de probabilidad.....	57
Tabla 9. Rango de cobertura .....	57
Tabla 10. Rango de recuperación.....	58
Tabla 11. Rango de duración.....	58
Tabla 12. Clasificación del I.I.A.....	59
Tabla 13. Matriz de evaluación de impactos ambientales – inyección de agua caliente. ....	60
Tabla 14. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de Agua Caliente.....	62
Tabla 15. Matriz de evaluación de impactos ambientales – ASP (Alcali-Polímero-Surfactante) .....	65
Tabla 16. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de ASP (Alcali-Polímero-Surfactante).....	67
Tabla 17. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de polímeros .....	70
Tabla 18. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de polímeros .....	71
Tabla 19. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección continua de vapor.....	74

Tabla 20. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección continua de vapor.....	76
Tabla 21. Matriz de evaluación de impactos ambientales – Inyección cíclica de vapor.....	79
Tabla 22. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección cíclica de vapor.....	81
Tabla 23. Matriz de evaluación de impactos ambientales – SAGD (drenaje gravitacional asistido por vapor) .....	83
Tabla 24. Matriz de calificación de impactos ambientales - SAGD (Drenaje Gravitacional Asistida por Vapor).....	85
Tabla 25. Matriz de evaluación de impactos ambientales – VAPEX.....	88
Tabla 26. Matriz de calificación de impactos ambientales - VAPEX.....	91
Tabla 27. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales para todos los métodos.....	94

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Cuenca de los Llanos Orientales .....	27
Figura 2. Región de los Llanos Orientales u Orinoquia.....	29
Figura 3. Cuenca del Valle Medio Magdalena .....	31
Figura 4. Valle Medio del Magdalena.....	33
Figura 5. Cuenca del Valle Superior Magdalena.....	35
Figura 6. Valle Superior del Magdalena .....	37
Figura 7. Cuenca del Putumayo-Caguán .....	38
Figura 8. Parque Nacional Natural Chiribiquete.....	40
Figura 9. Cuenca de la Cordillera Oriental .....	42
Figura 10. Proceso de inyección de agua caliente.....	46
Figura 11. Proceso de inyección de ASP.....	47
Figura 12. Proceso de inyección de polímeros .....	48
Figura 13. Proceso de inyección continua de vapor .....	49
Figura 14. Proceso de inyección cíclica de vapor.....	50
Figura 15. SAGD.....	51
Figura 16. Proceso de VAPEX.....	52
Figura 17. Esquema del árbol de decisiones .....	100

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección de agua caliente.....	63
Gráfica 2. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – ASP.....	68
Gráfica 3. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección de polímeros. ....	73
Gráfica 4. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección continua de vapor. ....	77
Gráfica 5. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección cíclica de vapor.....	82
Gráfica 6. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – SAGD.....	87
Gráfica 7. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – VAPEX.....	93
Gráfica 8. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales para todos los métodos.....	94

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Anexo 1. Herramienta de Selección

## GLOSARIO

**DISPONIBILIDAD HÍDRICA:** Es la oferta hídrica de la región, la cual se obtiene luego de restar al caudal hídrico total de la región, el agua que se ha otorgado a las distintas actividades industriales, agrícolas y agropecuarias de la región, la demanda hídrica de la comunidad y el caudal ecológico. <sup>1</sup>

**CAUDAL ECOLÓGICO:** El agua reservada para preservar valores ecológicos, los hábitats naturales que cobijan riqueza de flora y fauna, las funciones ambientales como purificación de aguas, amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos, los parques naturales y la diversidad de paisajes. Corresponde 25% (veinticinco por ciento) del caudal que queda disponible después de haber restado el agua otorgada a las distintas actividades industriales, agrícolas y agropecuarias de la región y el agua de consumo de comunidad al caudal total de la región.<sup>2</sup>

**TERRENO QUEBRADO:** Terreno que es desigual, tortuoso o zigzagueante. De difícil acceso.<sup>3</sup>

**ESCOMBRERAS Y VERTEDEROS:** Son espacios en los que se depositan restos de construcción, residuos urbanos, desechos industriales y material estéril de minas.<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> SILVA HIDALGO, Humberto, ALDAMA, Álvaro, DOMÍNGUEZ, Ignacio, ALARCÓN-HERRERA, María Teres. Metodología para la determinación de disponibilidad y déficit de agua superficial en cuencas hidrológicas: aplicación al caso de la normativa mexicana. [En línea]. Artículo técnico. México: Universidad Autónoma de Chihuahua, 2012. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000100002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000100002)

<sup>2</sup> IDEAM. Participación ciudadana: Hidrología. [En línea]. Colombia: MinAmbiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/hidrologia>

<sup>3</sup> THE FREE DICTIONARY. Definición de Quebrado. [En línea]. Disponible en: <https://es.thefreedictionary.com/quebrado>

<sup>4</sup> IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. [En línea]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 2008. p.107. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/Openbiblio/bvirtual/021521/LIBROCO RINEFINAL.pdf>.

**CULTIVOS TRANSITORIOS:** Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo dura un año o menos, llegando incluso a ser de unos pocos meses; tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo.<sup>5</sup>

**CULTIVOS PERMANENTES:** Comprende los territorios cuyas tierras están dedicadas a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos de herbáceas como: caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; los cultivos arbustivos como: café y cacao; y los cultivos arbóreos como: palma africana y árboles frutales.<sup>6</sup>

**PASTOS LIMPIOS:** Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, enclamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.<sup>7</sup>

**PASTOS ARBOLADOS:** Cobertura que incluye las tierras cubiertas con pastos en los cuales se han estructurado potreros con presencia de árboles de altura superior a 5 metros, distribuidos en forma dispersa. La cobertura de árboles debe ser mayor al 30% y menor al 50% del área de pastos arbolados.<sup>8</sup>

**PASTOS ENMALEZADOS O ENRASTROJADOS:** Son las coberturas representadas por tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de rastrojos, debido principalmente a la realización de escasas prácticas de manejo o la ocurrencia de procesos de abandono. En general, la altura del rastrojo es menor a 1,5 metros.<sup>9</sup>

---

<sup>5</sup> *Ibíd.*, p. 110

<sup>6</sup> *Ibíd.*, p. 114

<sup>7</sup> *Ibíd.*, p. 123

<sup>8</sup> *Ibíd.*, p. 125

<sup>9</sup> *Ibíd.*, p. 126

**BOSQUES:** Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal o en algunos casos con varios tallos, que tiene una copa más o menos definida.

De acuerdo con FAO (2001), los bosques comprenden los bosques naturales y las plantaciones. Se refiere a la tierra con una cubierta de copa (o su grado equivalente de espesura) de más del 10 por ciento del área y una superficie superior a 0,5 hectáreas (ha). Los bosques son determinados por la presencia de árboles, así como por la ausencia de otro uso predominante de la tierra. Los árboles deben alcanzar una altura mínima de 5 metros (m).<sup>10</sup>

**FAO:** Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura.

**RESILIENCIA:** es la cantidad de cambio o transformaciones que un sistema complejo puede soportar manteniendo las mismas propiedades funcionales y estructurales.<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> Ibid., p. 132

<sup>11</sup>CALVENTE, Arturo. Resiliencia: un concepto clave para la sustentabilidad. [En línea]. Universidad Abierta Interamericana. UAIS-CS-200-003, 2007. p.2. Disponible en: <http://capacitacionpedagogica.uai.edu.ar/pdf/cs/UAIS-CS-200-003%20-%20Resiliencia.pdf>

## RESUMEN

**TITULO:** ANÁLISIS TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE RECObRO PARA CAMPOS DE CRUDO PESADO Y EXTRA-PESADO CON MAYOR APLICABILIDAD EN COLOMBIA\*

**AUTORES:** MARÍA FERNANDA RODRÍGUEZ RIVERA, CRISTIAN ARTURO SUÁREZ SUÁREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Yacimientos, pesados, extra pesados, factor de recobro, cuencas sedimentarias, ambiental.

### DESCRIPCION:

En la actualidad, los yacimientos de crudo pesado y extra-pesado en explotación representan gran parte de las reservas de crudo del país, con un 60% de la producción actual y un aproximado de 1,600 millones de reservas, es importante apuntar a la extracción de dichos recursos, esto mediante métodos de recobro viables, cuyo desarrollo permitiría aumentar el factor de recobro y así pasar de un 18% a un 35% en los próximos años, permitiendo aumentar la producción sin necesidad de nuevos hallazgos ni el desarrollo de proyectos costa afuera o de mayor complejidad.

Por lo tanto, en este trabajo se presentan las cuencas sedimentarias en las cuales hay concentración y producción de crudos pesados y extra-pesados desde un punto de vista geológico, petrofísico y ambiental, permitiendo la selección y análisis para los métodos de recobro con mayor aplicabilidad en el país, el análisis realizado a cada método de recobro seleccionado está basado en su proceso y desarrollo, lo cual permite obtener de una manera más clara la necesidad de recursos y generación de residuos en cada etapa, que al ser evaluados a través de un análisis ambiental general para cada método, permitirá identificar los potenciales impactos que estos pueden generar en el lugar donde se vayan a aplicar, con esto claro es importante recalcar que hoy en día el uso de los recursos naturales y el tema ambiental pueden complicar la viabilidad de un proyecto, por lo tanto, se tiene como objetivo la comparación de los impactos que genera cada método y por ende el desarrollo de un instrumento que basado en unos criterios básicos ambientales y que por medio de unas preguntas y una toma de decisiones (Si o No) permitirá la selección de un método de recobro que sea apropiado ambientalmente para el lugar en el cual se vaya a desarrollar el proyecto.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra, Aspirante a MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos

## ABSTRACT

**TITLE:** TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF RECOVERY SYSTEMS FOR HEAVY AND EXTRA-HEAVY OILS FIELDS WITH GREATER APPLICABILITY IN COLOMBIA\*

**AUTHORS:** MARÍA FERNANDA RODRÍGUEZ RIVERA. CRISTIAN ARTURO SUÁREZ SUÁREZ. \*\*

**KEYWORDS:** Reservoir, heavy, extra-heavy, oil recovery factor, sedimentary basin, environmental.

### DESCRIPTION:

At present, the deposits of heavy and extra-heavy oil in operation represent a large part of the country's crude reserves, with 60% of current production and an estimated 1,600 million reserves, it is important to aim at the extraction of These resources, this through viable recovery methods, whose development would increase the recovery factor and thus go from 18% to 35% in the coming years, allowing to increase production without the need for new findings or the development of offshore projects or of greater complexity.

Therefore, in this work sedimentary basins are presented in which there is concentration and production of heavy and extra-heavy crude from a geological, petrophysical and environmental point of view, allowing the selection and analysis for recovery methods with greater applicability in the country, the analysis performed on each selected recovery method is based on its process and development, which allows obtaining in a clearer way the need for resources and generation of waste at each stage, which is evaluated through a general environmental analysis for each method, will identify the potential impacts that these can generate in the place where they are going to apply, with this clear it is important to emphasize that today the use of natural resources and the environmental issue can complicate the viability of a project, therefore, aims to compare the impacts generated by each method and therefore the development of an instrument that based on basic environmental criteria and that by means of some questions and a decision making (Yes or No) will allow the selection of a recovery method that is environmentally appropriate for the place where the draft.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Harving Díaz Consuegra, Aspiring MSc. in Hydrocarbon Engineering

## INTRODUCCIÓN

Las altas demandas energéticas en el país han permitido que se le dé una mayor importancia a los crudos pesados y extra-pesados, ya que estos actualmente constituyen una gran parte de las reservas y son el 60% de la producción actual. La aplicación de nuevos proyectos permitiría aumentar el factor de recobro del país a niveles esperados, de un 18% actual a un 35% en el 2020, lo cual a su vez generaría aumentos en la producción sin la necesidad de nuevos hallazgos o proyectos que requieran de una mayor complejidad. Así que centrarse en nuevas tecnologías y métodos de recobro apropiados para las características geológicas y naturales del país, podrían generar un gran avance en los resultados que se esperan en un futuro en cuanto a desarrollo e innovación, permitiendo que Colombia se enfoque a ser uno de los países modelo junto a Canadá y Venezuela respecto a la explotación y producción de crudos pesados y extra-pesados, con un compromiso ambiental alto.

De tal manera se proponen algunos métodos de recobro, lo cuales por sus características y las características geológicas, petrofísicas y naturales del país pueden tener una mayor viabilidad, con tal importancia se realizan análisis ambientales generales para cada uno de ellos que permitan demostrar que tan impactantes son de acuerdo a las actividades a realizar y en base a esto diseñar un método de selección basado en los resultados, que permita seleccionar desde el punto de vista ambiental el mejor método para desarrollar en la zona en la cual existe la producción o almacenamiento de crudos pesados y extra-pesados.

## 1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS

### 1.1 GRAVEDAD API

La gravedad API (American Petroleum Institute) es un método de clasificación según la densidad (viscosidad y fluidez) del crudo en comparación con el agua a temperaturas iguales. De esta forma la densidad API es la medida inversa a su gravedad específica respecto al agua.<sup>12</sup>

Según su gravedad API, el crudo se puede clasificar de la siguiente manera:

Tabla 1. Clasificación por °API del crudo (Adaptada de Cabarcas, 2015)

CRUDO	ESCALA API	DENSIDAD
Liviano	Gravedades > a 31.1°	0.87 – 0.83 g/cm <sup>3</sup>
Mediano	22.3° - 31.1°	0.92 – 0.87 g/cm <sup>3</sup>
Pesado	10° - 22.3°	1 – 0.92 g/cm <sup>3</sup>
Extra pesado	Gravedades < a 10°	> 1 g/cm <sup>3</sup>

### 1.2 CUENCA SEDIMENTARIA

Una cuenca sedimentaria es una acumulación importante de sedimentos producto de la erosión de la superficie de la Tierra. Se suele hablar de cuenca sedimentaria cuando el espesor de sedimento es al menos de unos cientos de metros y tiene una extensión de algunas decenas de kilómetros cuadrados o más<sup>13</sup>. Las cuencas sedimentarias pueden tener forma de cubeta o de fosa alargada, y es en ellas en las cuales se encuentran almacenados los hidrocarburos.

<sup>12</sup> SILES ARIAS, Yordan Michael. Tipos de Petróleo Crudo Según Grado API.[En línea]. p. 2. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/313841475/Tipos-de-Petroleo-Crudo-Segun-Grado-API>

<sup>13</sup> LA COMUNIDAD PETROLERA. Cuenca Sedimentaria. [En línea]. Disponible en: <https://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/1234-cuenca-sedimentaria>

### **1.3 ANÁLISIS AMBIENTAL (EVALUACIÓN AMBIENTAL)**

La evaluación ambiental tiene como fin identificar los impactos ambientales de un proyecto o actividad, determinar el cambio que generan sobre el entorno y verificar el cumplimiento de la normativa. Estas evaluaciones ambientales nos dan a conocer el estado de los componentes del entorno, posibilitando la planificación de las acciones a tomar a fin de mantener o mejorar las características del medioambiente.

### **1.4 RECUPERACIÓN MEJORADA (EOR)**

La recuperación mejorada consiste en el conjunto de técnicas por medio de las cuales se recupera una mayor cantidad de aceite residual en la matriz de la formación. Durante este tipo de recuperación son implementadas técnicas que alteran las propiedades originales del sistema roca-fluido.

La recuperación mejorada de petróleo puede comenzar después de los procesos de recuperación secundaria y primaria o en cualquier momento durante la vida de un yacimiento.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> FLORES BARROSO, Aarón Armando y MARÍN RANGEL, Cesar Emmanuel. VAPEX inyección de solventes y potencial aplicación en yacimientos de México. Tesis de pregrado, en mención al título de Ingeniero Petrolero. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2017. p. 15

## 2. IDENTIFICACIÓN DE LAS CUENCAS

Gracias a varios procesos geológicos ocurridos millones de años atrás, Colombia es un país que actualmente cuenta con un total de 23 cuencas sedimentarias, divididas en productoras y no productoras, encontrando quince (15) cuencas no productoras y ocho (8) productoras, de estas ocho (8) cuencas serán definidas aquellas que produzcan crudos pesados y extra-pesados, por lo tanto, este será el principal factor de identificación, la producción o no de este tipo de crudos en las cuencas.

Tabla 2. Cuencas sedimentarias productoras en Colombia (Adaptado de ANH, 2010).

### *Producción actual de petróleo en Cuencas Maduras*

Cuenca	Area (Km <sup>2</sup> )	Producción Actual (BOPD)	Porcentaje Producción Nacional	No. Campos Petróleo	No. Campos Gas	Campos crudo liviano	Campos crudo medio	Campos crudo pesado	Campos crudo extrapesado
Llanos Orientales	225.603	537.311	67,62%	146	1	61	44	39	2
Valle Medio del Magdalena	32.949	116.160	14,62%	63	21	10	22	31	0
Valle Superior del Magdalena	21.513	76.684	9,65%	46	16	12	17	17	0
Putumayo-Caguán	110.304	20.981	2,64%	26	0	10	14	1	1
Catatumbo	7.715	3.393	0,43%	6	1	4	2	0	0
Cordillera Oriental	71.766	39.637	4,99%	5	1	3	1	1	0
<b>Total</b>	<b>469.850</b>	<b>794.655</b>	<b>100%</b>	<b>296</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>3</b>

Diferentes estudios realizados en el país por la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos) han permitido obtener de manera más clara aquellas cuencas que producen crudos pesados y extra pesados, identificando claramente cinco (5) cuencas. Estas cuencas son: Cuenca de los Llanos Orientales, Cuenca del Valle

Medio del Magdalena, Cuenca Superior del Magdalena, Cuenca Putumayo-Caguán y la Cuenca de la Cordillera Oriental. A su vez se puede observar que el mayor aporte lo genera la cuenca de los Llanos Orientales y se puede dar a entender el desarrollo que progresivamente se va dando en la cuenca Putumayo-Caguán hoy en día una zona de gran interés en la investigación de este tipo de hidrocarburos.

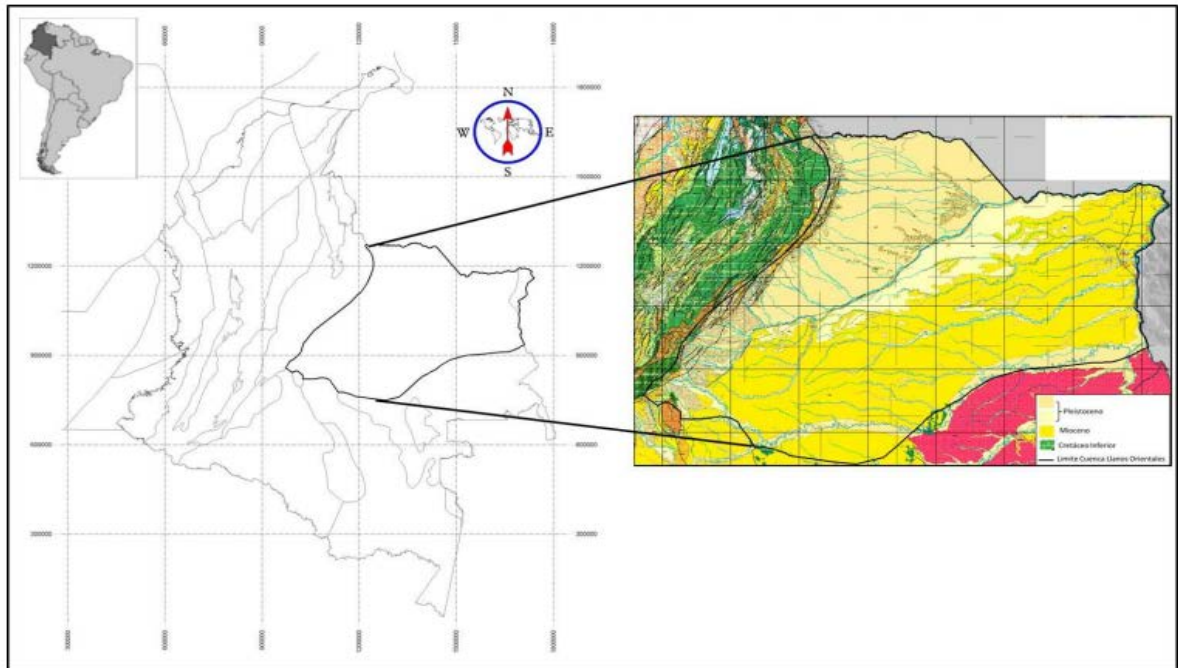
## **2.1 CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES**

Es una de las cuencas más importantes del país, produciendo más de la mitad del crudo colombiano. El sistema petrolífero es conocido, la ruta de migración es larga especialmente para la zona central y oriental de la cuenca por lo que se tiene mayor producción hacia el Occidente. El sello disminuye hacia el Este y es común la biodegradación.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> VARGAS JIMÉNEZ, Carlos Alberto. Nuevos aportes a la estimación del potencial de hidrocarburos en Colombia, 2009. p.17 (33). ISSN 0370-3908. Disponible [En línea]: <https://es.scribd.com/document/90881982/Nuevos-Aportes-Al-Conocimiento-Sobre-Potencial-Hidrocaburifero-de-Colombia-1>

Figura 1. Cuenca de los Llanos Orientales (Adaptado de ANH. Mapa Geológico/Ingeominas, 2010).



**2.1.1 Generalidades de la cuenca.** La cuenca de los Llanos Orientales se ubica entre los departamentos de Meta, Arauca, Casanare, Guainía y Guaviare, limita al norte con Venezuela y se prolonga más allá del río Arauca, al sur son el Arco del Guaviare y La Serranía de la Macarena, al occidente con la Cordillera Oriental y al oriente con el Escudo Guayanés<sup>16</sup>, posee un área de 285.437 Km<sup>2</sup>, la gravedad API varía desde los 7° hasta los 42°, destacándose campos como Chichimene, Castilla, Rubiales, Palagua y Quifa como productores de crudo pesado y extra-pesado. <sup>17</sup> Esta cuenca produce diariamente un promedio de 425 KBPD, de los cuales aproximadamente 187.000 son crudos pesados y extra pesados, 121.000 son crudos medianos y 116.000 son crudos livianos<sup>18</sup>.

Su sistema petrolífero, se presenta a continuación con los siguientes rasgos:

<sup>16</sup> LÓPEZ, Adelaida, CORTES, Alberto y CUELLAR, Durley. Cuenas sedimentarias de Colombia. [En línea]. Colombia: INSTITUTO CET PETROL, 2012. p.15. Disponible en: <https://es.slideshare.net/macorca123/cuenas-sedimentarias-de-colombiadoc-1>

<sup>17</sup> *Ibid.* p.17

<sup>18</sup> *Ibid.* p.17

Tabla 3. Generalidades de la cuenca Llanos Orientales (Adaptada de VARGAS, 2009)

<b>SISTEMA PETROLIFERO CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES</b>	
<b>Tipo de cuenca</b>	Ante país/cenozoico (*)
<b>Roca fuente</b>	Formaciones Gacheta, Villeta y Carbonera. (**)
<b>Migración</b>	Dos pulsos de migración han sido documentados, el primero durante el Eoceno - Oligoceno superior, el segundo comienza en el Mioceno y continua hasta el presente. (**)
<b>Roca almacenadora o reservorio</b>	Formaciones Carbonera (C3, C5 y C7), Barco y Mirador. (**)
<b>Roca sello</b>	Formaciones Carbonera (C2, C8) (**) y León.
<b>Trampa</b>	Anticlinales fallados, fallas antitéticas, trampas estratigráficas. (**)

(<sup>19\*</sup>) tabla 5 p.10 (26) y (<sup>20\*\*</sup>) tabla 4 p.12

Se estima que el espesor promedio del reservorio esta entre 30ft - 590ft con una porosidad entre el 10% - 30% y una saturación de agua entre el 37.3% - 76.95%.<sup>21</sup>

**2.1.2. Descripción natural de la cuenca de los Llanos Orientales.** La cuenca de los Llanos Orientales es una región determinada por la cuenca del río Orinoco y su ecosistema se caracteriza por ser una planicie, que tiene como característica sus extensas sabanas de zona intertropical y bosques de galería.<sup>22</sup>

<sup>19\*</sup> Algunos rasgos generales sobre el sistema petrolífero de las cuencas sedimentarias de Colombia.

<sup>20\*\*</sup> Información general de cuencas y rangos para los parámetros básicos usados en la simulación por Monte Carlo

<sup>21</sup> VARGAS JIMENEZ. Óp cit., p.10 (26)

<sup>22</sup> WIKIPEDIA. Región de la Orinoquía (Colombia).[En Línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Región\\_de\\_la\\_Orinoqu%C3%ADa\\_\(Colombia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Región_de_la_Orinoqu%C3%ADa_(Colombia))

Figura 2. Región de los Llanos Orientales u Orinoquia (Adaptado de PALMER, 2011)



“Cuenta con unos grandes paisajes determinados por cinco (5) subregiones naturales, Piedemonte llanero, Llanuras del Meta, Llanuras del Guaviare, Pantanos de Arauca y la Serranía de la Macarena”<sup>23</sup>, todas ellas de vital importancia en el ecosistema de la región.

Entre estas subregiones se encuentran 40 reservas naturales de gran importancia como lo son; Las Unamas (Meta), Las Delicias (Casanare), Rancho Santa Bárbara (Vichada), Refugio Nimajay (Vichada) y La Serranía de la Macarena (Meta), entre otras, siendo esta última la más representativa<sup>24</sup>.

Cuenta con varios parques nacionales naturales, protegidos y administrados por el SINAP (Sistema Nacional de Área Protegidas), algunos de estos son: Parque Nacional Natural Cordillera de Los Picachos, Parque Nacional Chingaza, Parque Nacional Natural Sierra de la Macarena, Parque Nacional Natural El Tuparro, Parque Nacional Natural Tinigua y el Parque Nacional Natural Sumapaz.<sup>25</sup>

---

<sup>23</sup> *Ibíd.*

<sup>24</sup> PEÑUELA RECIO, Lourdes, CASTRO, Francisco y OCAMPO PEÑUELA, Natalia. Las Reservas Naturales del Nudo Orinoquia en su rol de conservación de la biodiversidad. [En línea]. Colombia: Fundación Horizonte Verde y Resnatur, 2011. p.24 (104). Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/8284/1/RESERVAS-NATURALES-ORINOQUIA.pdf>

<sup>25</sup> SINAP. Parques Nacionales Naturales de Colombia. Bogotá D.C, 2002 - 2009

Los Llanos Orientales debido a la variación en su ecosistema es una zona en la que abunda la fauna y flora y en algunas de las subregiones se encuentran diversas especies de animales, comprendidas entre mamíferos, aves, insectos y reptiles. Actualmente es una zona en estudio debido a nuevas especies encontradas.

Hidrográficamente la región cuenta con un aproximado de 6 cuencas mayores, la cuenca del río Guaviare (140.000 Km<sup>2</sup>), la cuenca del río Meta (112.000 Km<sup>2</sup>), cuenca del río Vichada (26.000 Km<sup>2</sup>), cuenca del río Tomo (20.000 Km<sup>2</sup>), cuenca del río Arauca (8.000 Km<sup>2</sup>, parte colombiana), cuenca del río Casanare y otras cuencas (22.000 Km<sup>2</sup>) las cuales vierten en el río Orinoco, juntas suman un total de 328.000 Km<sup>2</sup> <sup>2627</sup>. A su vez cuenta con un aproximado de 92 subcuencas que los alimentan.

## **2.2 CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

Es una de las cuencas más exploradas y más prolíficas del país, y en ella se han descubierto cerca de 2.412 MBP y 2.5 TPCG localizados en más de 50 campos, entre ellos el primer campo gigante descubierto en Colombia (La Cira- Infantas)<sup>28</sup>.

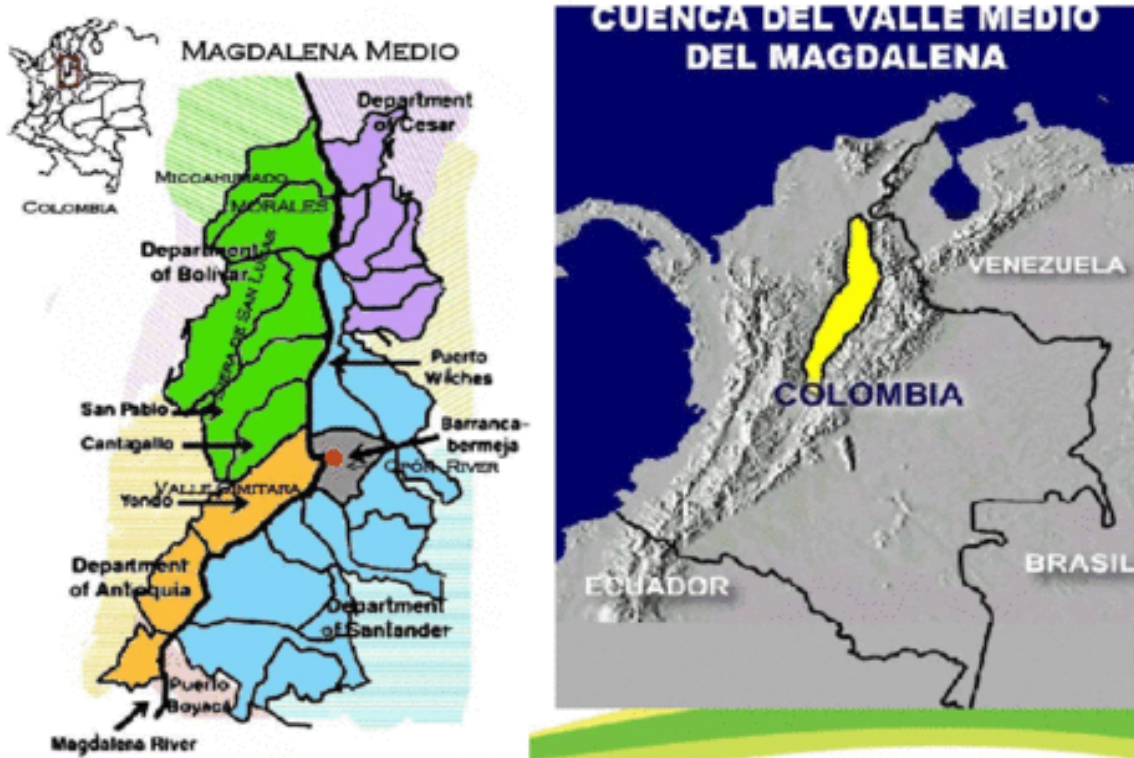
---

<sup>26</sup> WIKIPEDIA. Óp cit.

<sup>27</sup> CORREA, Hernán Darío, RUIZ, Sandra Lucía y ARÉVALO, Luz Marina. Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 – 2015. [En línea] Propuesta Técnica. Bogotá D.C.: Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ – Colombia, 2005. 273 p. Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/world/co/co-nbsap-oth-es.pdf>

<sup>28</sup> LÓPEZ, CORTES, y CUELLAR. Óp cit. p. 12

Figura 3. Cuenca del Valle Medio Magdalena (Adaptado Fundación Universitaria del Área Andina, 2016)



**2.2.1 Generalidades de la cuenca.** La cuenca del Valle Medio del Magdalena se ubica entre la Cordillera Central y Oriental, limita al norte con el sistema de fallas del Espíritu Santo, al sur con el cinturón plegado de Girardot y al Noroeste con las fallas de Bucaramanga y Santa Marta, al oriente con el sistema de fallas de Bituima y La Salina, al occidente con la superposición de sedimentos Neógenos sobre la Serranía de San Lucas y el basamento de la Cordillera Central, posee un área de 34.000 Km<sup>2</sup>, su gravedad API varía entre los 13° y 45°, destacándose campos de crudo pesado como La Cira, Casabe, Moriche, Teca-Nare. La cuenca del Valle Medio del Magdalena tiene una producción diaria aproximada de 120.000 BOPD, de los cuales el 66% son crudos pesados, el 31% crudos medios y el 3% crudos livianos.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Ibíd. p.13-14

Su sistema petrolífero, se presenta a continuación con los siguientes rasgos:

Tabla 4. Generalidades de la cuenca Valle Medio Magdalena (Adaptada de VARGAS, 2009)

<b>SISTEMA PETROLIFERO CUENCA VALLE MEDIO DEL MAGDALENA</b>	
<b>Tipo de cuenca</b>	Poli-histórica, apertura de rift, Ante país fracturado (*)
<b>Roca fuente</b>	La Luna, Simiti, Tablazo y Grupo calcáreo Basal. (**)
<b>Migración</b>	Migración vertical directa por la inconformidad del Eoceno o a través de fallas y migración lateral a lo largo de arenas del Eoceno. (**)
<b>Roca almacenadora o reservorio</b>	Formaciones Lisama, Esmeraldas-La Paz, y Colorado-Mugrosa, la Luna, Umir, Barco. (**)
<b>Roca sello</b>	Formaciones Esmeraldas, Colorado. Potencialmente los shales de las formaciones Simiti y Umir. (**)
<b>Trampa</b>	1) Fallas relacionadas a pliegues bajo superficies de cabalgamiento, 2) Estructuras dúplex con cierres de falla independientes, 3) Cierres estructurales donde los estratos de los yacimientos buzan contra las fallas, 4) Trampas en el bloque colgante de las fallas sellantes. (**)

(<sup>30\*</sup>) tabla 5 p.11 (27) y (<sup>31\*\*</sup>) tabla 4 p.12

Se estima que el espesor promedio del yacimiento se encuentra entre 163ft y 500ft con una porosidad que va desde el 12% hasta un 25%.<sup>32</sup>

**2.2.2 Descripción natural de la cuenca del Valle Medio Magdalena.** Es un extenso valle interandino y abierto en la parte central de Colombia formado por el río Magdalena que va hacia las llanuras del Caribe. Es una zona que comprende los departamentos de Antioquia, Bolívar, Boyacá, Cesar y Santander, y en menor medida entre Caldas, Cundinamarca y Tolima.<sup>33 34</sup>

<sup>30\*</sup> Algunos rasgos generales sobre el sistema petrolífero de las cuencas sedimentarias de Colombia.

<sup>31\*\*</sup> Información general de cuencas y rangos para los parámetros básicos usados en la simulación por Monte Carlo

<sup>32</sup> VARGAS JIMENEZ. Óp cit. p.11 (27)

<sup>33</sup> WIKIPEDIA. Magdalena medio. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Magdalena\\_Medio](https://es.wikipedia.org/wiki/Magdalena_Medio)

<sup>34</sup> FINKEROS. La región del Magdalena Medio. [En línea]. 2013. Disponible en: <http://abc.finkeros.com/la-region-del-magdalena-medio/> [Recuperado el 30 de octubre de 2013 ].

Figura 4. Valle Medio del Magdalena (Adaptado de RIEDEL)



Es una región rica en bosques, tipo galería y secundarios en zonas cercanas al río Magdalena y sus afluentes, actualmente es una zona propicia para la ganadería y la agricultura, por su extenso terreno y la poca flora referida de gran importancia en varias zonas de esta cuenca. No cuenta con grandes parques nacionales naturales pero la flora que allí se presenta ha permitido que se encuentre diversidad de fauna abundante y de gran importancia en la región y a nivel nacional, encontrando más de 500 especies entre avifauna, ictiofauna, mamíferos, reptiles e insectos.<sup>35</sup>

La mayor parte de la flora que allí se encuentra es debido a la gran cantidad de humedales (Más de 450) ubicados en las llanuras de inundación en su vertiente oriental y otros de origen natural, por lo tanto, son zona de gran importancia y de conservación, por las autoridades competentes.

---

<sup>35</sup> CABALLERO ACOSTA, Humberto, DURANGO LÓPEZ, Consuelo y GIRALDO CASTRO, Carlos Augusto. Los humedales del Magdalena medio antioqueño desde una perspectiva física y sociocultural. [En línea]. 2001. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53695/1/Gest.%20y%20Amb.%20Vol.%204%20No.%202-67.pdf>

Hidrográficamente, el río de mayor importancia es el Magdalena, parte de Antioquia comprende los ríos de Cimitarra, Alicante, Tamar, San Francisco, San Bartolomé y las ciénagas de San Bartolo, Barbacoas, Maquencal, El Tablazo, San Francisco, Caño Don Juan y la Gloria, por Santander sus principales afluentes son: río Carare, El Opón, Sogamoso y Lebrija. Por Boyacá el Río Negro que se encuentra compartido con Cundinamarca.<sup>36</sup>

### **2.3 CUENCA DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA**

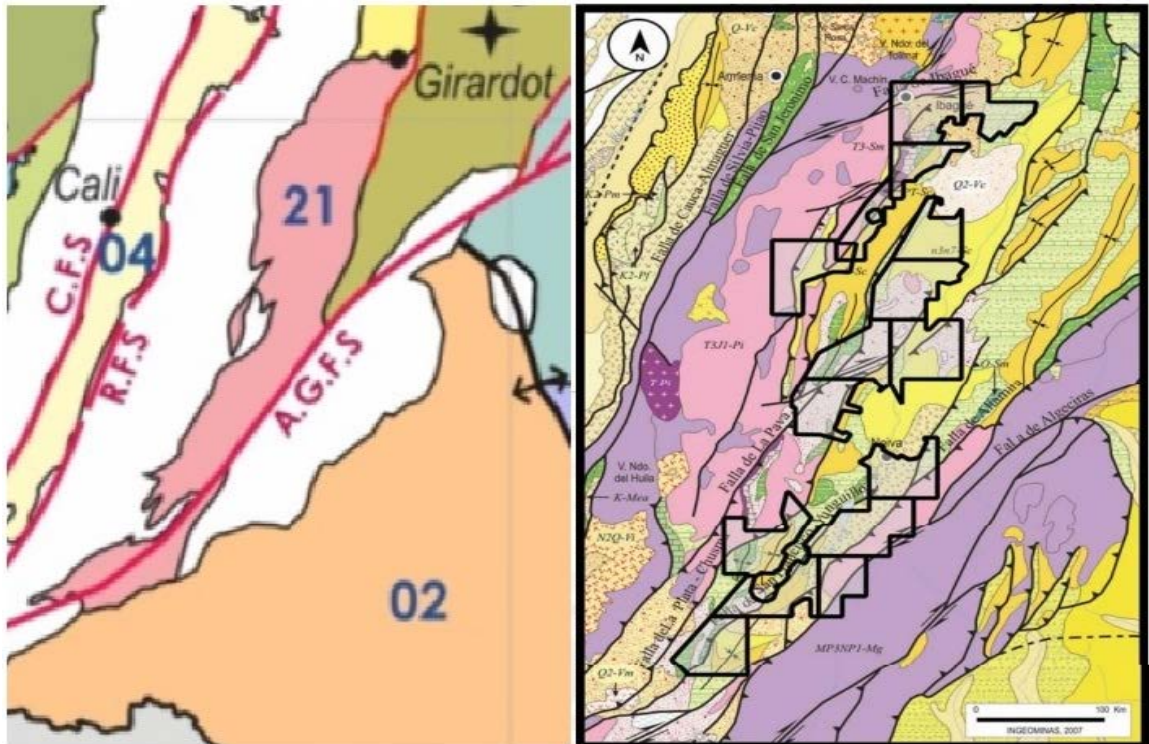
Es una cuenca con un alto potencial de producción, a pesar de sus pocos campos productores presentes en la actualidad; cabe destacar que la producción de yacimientos naturalmente fracturados no ha sido caracterizada y puede aportar importantes volúmenes en cuanto a las reservas de crudo en nuestro país.<sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> *Ibíd.*

<sup>37</sup> ARCILA ESTRADA, María Teresa, LÓPEZ, John Fredy, MUÑOZ, Jenny y MARTÍNEZ Lucía. Magdalena Medio Desarrollo regional: una tarea común universidad-región. [En línea]. Grupo de investigación región Magdalena Medio. Medellín: Universidad de Antioquia, 2003. Disponible en: <http://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/7a67a97c-190f-4760-ab68-e493f2fbddb4/caracterizacion-magdalena-medio.pdf?MOD=AJPERES>

Figura 5. Cuenca del Valle Superior Magdalena (Adaptado de MOJICA, 2009 y ANH, 2010)



**2.3.1 Generalidades de la cuenca.** La cuenca Valle Superior del Magdalena se encuentra extendida desde Pitalito en el sur, hasta Honda en el norte, limitando allí con el Cinturón Plegado de Girardot, al sur con el sistema de fallas de Algeciras-Garzón, al oriente con el sistema de fallas Bituimina-La Salina y al occidente con la Cordillera Central, posee un área de 26.200 Km<sup>2</sup>. La gravedad API de los crudos que allí se producen varían desde los 12° hasta los 35°, los campos en los que se produce petróleo pesado son Campo Tello y La Jagua, y San Francisco<sup>38</sup>.

La cuenca del Valle Superior del Magdalena produce en promedio 88.000 BOPD, de los cuales 26.000 son crudos pesados, 53.000 son crudos medianos y 7.800 son crudos livianos. Presenta una porosidad promedio entre 11 – 25%.

<sup>38</sup> LÓPEZ, CORTES, y CUELLAR. Óp cit., p. 8

Su sistema petrolífero, se presenta a continuación con los siguientes rasgos:

Tabla 5. Generalidades de la cuenca Valle Superior Magdalena (Adaptada de VARGAS, 2009)

<b>SISTEMA PETROLIFERO CUENCA VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA</b>	
<b>Tipo de cuenca</b>	Poli-histórica, apertura de rift, Antepaís fracturado (*)
<b>Roca fuente</b>	Formaciones La Luna, Bamnucá y Tetuán.
<b>Migración</b>	Migración vertical directa por la inconformidad del Eoceno o a través de fallas y migración lateral a lo largo de arenas del Eoceno. (***)
<b>Roca almacenadora o reservorio</b>	Formaciones Gr. Honda, Monserrate y Caballos. (**)
<b>Roca sello</b>	Formaciones Gr. Honda, Guaduala y Bambucá. (***)
<b>Trampa</b>	1) Fallas relacionadas a pliegues bajo superficies de cabalgamiento, 2) Estructuras dúplex con cierres de falla independientes, 3) Cierres estructurales donde los estratos de los yacimientos buzan contra las fallas, 4) Trampas en el bloque colgante de las fallas sellantes. (**)

(<sup>39\*</sup>) tabla 5 p.12 (28) y (<sup>40\*\*</sup>) tabla 4 p.12<sup>41</sup>

**2.3.2. Descripción natural de la cuenca del Valle Superior del Magdalena.** Es un valle que forma las partes planas de los departamentos de Huila y Tolima, Se extiende desde el Estrecho del Magdalena en el Huila hasta los rápidos de Honda, en el Tolima. <sup>42</sup>

<sup>39\*</sup> Algunos rasgos generales sobre el sistema petrolífero de las cuencas sedimentarias de Colombia.

<sup>40\*\*</sup> Información general de cuencas y rangos para los parámetros básicos usados en la simulación por Monte Carlo

<sup>41</sup> Ibíd.

<sup>42</sup> WIKIPEDIA. Valle del río Magdalena. [En línea].2017. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Valle\\_del\\_r%C3%ADo\\_Magdalena](https://es.wikipedia.org/wiki/Valle_del_r%C3%ADo_Magdalena)

Figura 6. Valle Superior del Magdalena (Adaptado de Panorámico, 2011)



Presenta una variedad alta en flora y fauna hacia el sur del departamento del Huila, cerca al nacimiento del rio Magdalena y en cercanías a las cordilleras. En su valle hay algunas serranías, bosque seco tropical y bosques de galería los cuales adornan el paisaje cerca a los cuerpos de agua allí presentes, a su vez contiene grandes zonas desérticas con poca vegetación como lo es el Desierto de la Tatacoa, en donde la flora es relativamente poca debido a las altas temperaturas. En estas zonas desérticas se destaca la presencia de serpientes, arañas, escorpiones, lagartos, tortugas, roedores y tigrillos. Hacia el norte en el departamento del Tolima se puede apreciar una mayor flora debido a sus cercanías con las cordilleras (Central y Oriental) compensada por zonas secas y desérticas en menos proporción, principalmente son zonas propicias para agricultura y ganadería. Su flora consiste en bosque seco tropical y bosque de galería.



Caquetá y al occidente con el sistema de fallas encontrado en la Cordillera Oriental, contando con un área de 110.304 Km<sup>2</sup>. La gravedad API encontrada en esta zona varía desde 16° a 52°, allí se producen diariamente en promedio cerca de 24.000 BPD, de los cuales 936 son crudos pesados, 20.000 crudos medianos y 2.600 son crudos livianos.<sup>44</sup>

Su sistema petrolífero, se presenta a continuación con los siguientes rasgos:

Tabla 6. Generalidades de la cuenca Putumayo – Caguán (Adaptada de VARGAS, 2009)

<b>SISTEMA PETROLIFERO CUENCA PUTUMAYO-CAGUÁN</b>	
<b>Tipo de cuenca</b>	Ante país. (*)
<b>Roca fuente</b>	Formaciones Caballos y Villeta. (**)
<b>Migración</b>	Probablemente la migración es de oeste a este a lo largo de las areniscas del Fm. Caballos y Villeta. Migración vertical a lo largo de fracturas y zonas de falla. Expulsión de hidrocarburos comenzó en el Mioceno tardío poco después de la formación de las mayores estructuras. (**)
<b>Roca almacenadora o reservorio</b>	Formaciones Gr. Honda, Monserrate y Caballos. (***)
<b>Roca sello</b>	Formaciones Caballos, Villeta y Pepino. (***)
<b>Trampa</b>	Trampas estructurales asociadas con cabalgamiento y Subcabalgamiento en el oeste de la cuenca y levantamientos en el ante país. Pinchamientos y carbonatos. (**)

(<sup>45\*</sup> tabla 5. p.12 (28) y (<sup>46\*\*</sup>) tabla 4. p.9 (25) (<sup>47\*\*\*</sup>))

Se estima que el espesor promedio del reservorio es esta entre los 50ft – 30ft, con una porosidad que varía desde el 10% hasta el 16% con una permeabilidad de 50 mD y una saturación de agua comprendida desde el 16% hasta un 35%.<sup>48</sup>

**2.4.2. Descripción natural de la cuenca Putumayo-Caguán.** Comprende los departamentos del Putumayo y Caquetá, es una zona con colinas, mesetas, valles y llanuras densas, por donde corren ríos de origen amazónico.

<sup>44</sup> RAMÍREZ LÓPEZ, John. Biodiversidad del Tolima: entre parques naturales y ecosistemas estratégicos. [En línea]. Periódico el nuevo día. 2018. Disponible en: <http://www.elnuevodia.com.co/nuevodia/especiales/dia-del-tolima/253653-biodiversidad-del-tolima-entre-parques-naturales-y-ecosistemas-estr> [Publicado el 26 de Febrero del 2018]

<sup>45\*</sup> Algunos rasgos generales sobre el sistema petrolífero de las cuencas sedimentarias de Colombia.

<sup>46\*\*</sup> Información general de cuencas y rangos para los parámetros básicos usados en la simulación por Monte Carlo

<sup>47\*\*\*</sup> LÓPEZ, CORTES, y CUELLAR. Óp cit. p. 21

<sup>48</sup> VARGAS JIMENEZ. Óp cit. p.12 (28)

Figura 8. Parque Nacional Natural Chiribiquete (Adaptado de GAVIRIA)



Su flora es diversa y se acopla en bosque húmedos tropicales, bosques de alto y bajo desarrollo con una alta cantidad de especies nativas (más de 170) en el Putumayo, en el Caquetá se encuentra una selva densa y exuberante la cual comparte con la región de la Amazonia, cuenta con más o menos 74 especies de flora silvestre. Su abundante flora compartida permite albergar una cantidad de fauna considerable entre aves, mamíferos, peces, insectos y reptiles, los cuales generan una alta importancia para el ecosistema existente. En esta zona debido a la presión sobre los recursos naturales por parte del ser humano ha llevado a la protección de varias especies como lo son las guacamayas, el tucán, el tigre mariposo, el oso hormiguero y algunas especies de bagre. Actualmente se encuentran protegido bajo el SINAP (Sistema Nacional de Área Protegidas) el parque nacional natural La Paya, parte del parque nacional natural Serranía de la Macarena, parque nacional natural Serranía del Chiribiquete y Parque Nacional

Natural Serranía de los Churumbelos Auka-Wasi, en donde se estima que reside el 26% de las aves de todo el país.<sup>49</sup>

Cuenta con 2 grandes cuencas hidrográficas procedentes de la Cordillera Oriental que son el río Putumayo y el río Caquetá, actuales vertientes del río Amazonas, estas 2 cuencas son vertidas por ríos importantes como el río Orteguzza, el Caguán, el Yarí, el Cauca y el Sunsiya. Abarcando gran parte de la región y brindando estabilidad para la economía y los ecosistemas existentes en la cuenca gracias a sus humedales.<sup>50</sup>

## **2.5 CUENCA CORDILLERA ORIENTAL**

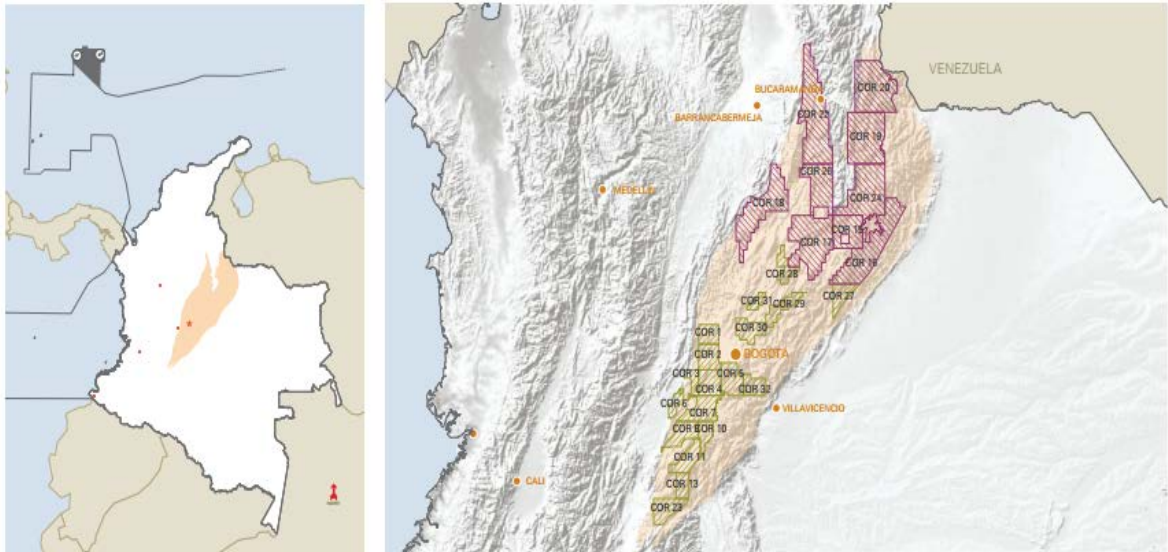
Es una cuenca en actual desarrollo en la cual solo se encuentra un campo de crudo pesado en desarrollo, mostrando niveles de producción moderados y un buen potencial de desarrollo.

---

<sup>49</sup> WIKIPEDIA. Putumayo (Colombia). [En línea]. 2017. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Putumayo\\_\(Colombia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Putumayo_(Colombia))

<sup>50</sup> OTAVO RODRÍGUEZ, Edgar. Mocoa. [En línea]. Mocoa. 2008. [Publicado en abril de 2008]. Disponible en: [http://www.corpoamazonia.gov.co/images/Publicaciones/24%202008\\_ESTADO\\_RECURSOS\\_NATURALES/2008\\_estado\\_recursos\\_naturales.pdf](http://www.corpoamazonia.gov.co/images/Publicaciones/24%202008_ESTADO_RECURSOS_NATURALES/2008_estado_recursos_naturales.pdf)

Figura 9. Cuenca de la Cordillera Oriental



Fuente: Adaptado de ANH Open Round. Colombia. 2010

**2.5.1 Generalidades de la cuenca.** Se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental, limitando al noroeste con la Cuenca Valle Magdalena Medio, al suroeste con la Cuenca Valle Superior del Magdalena y al Oriente con la Cuenca de los Llanos Orientales, posee un área de 31.000 Km<sup>2</sup>. La gravedad API que allí se encuentra varía entre los 18° y 35°, allí se obtiene una producción anual de 27.500 Bbls de crudo pesado, 761.000 Bbls de crudo mediano y 682.000 Bbls de crudo liviano.

Su sistema petrolífero, se presenta a continuación con los siguientes rasgos:

Tabla 7. Generalidades de la cuenca Cordillera Oriental (Adaptada de VARGAS, 2009)

<b>SISTEMA PETROLIFERO CUENCA CORDILLERA ORIENTAL</b>	
<b>Tipo de cuenca</b>	Ante país/cenozoico. (*)
<b>Roca fuente</b>	Formaciones La Luna, Une y Guaduas.
<b>Migración</b>	El primer pulso de generación ocurrió en el Cretácico tardío. El segundo pulso ocurrió desde el Mioceno al reciente. (**)
<b>Roca almacenadora o reservorio</b>	Formaciones Une y la Luna.
<b>Roca sello</b>	Shales de la formación Esmeralda, Formación Mugrosa, arcillolitas de Socha. (**)
<b>Trampa</b>	Las principales características estructurales son las fallas inversas que involucran basamento como resultado de la inversión de fallas normales preexistentes, fallas relacionadas a pliegues y estructuras en dúplex. (**)

(<sup>51\*</sup>) tabla 5. p.10 (26) y (<sup>52\*\*</sup>) tabla 4. p.12 (25)

Se estima que tiene una porosidad que varía entre el 5% y 10%, con una permeabilidad entre 4 y 100 mD con una saturación de agua del 95%.<sup>53</sup>

**2.5.2 Descripción natural de la cuenca de la Cordillera Oriental.** La Cordillera Oriental es una zona que posee un gran relieve entre los cuales se destaca el Altiplano Cundiboyacense y la Sierra Nevada del Cocuy (Únicos picos nevados de la cordillera), es considerada la más ancha y extensa de los 3 ramales en los que se divide la Cordillera de los Andes en territorio colombiano. Esta cuenca pasa por los departamentos de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Huila y Tolima, estos dos últimos en menor proporción. <sup>54</sup>

<sup>51\*</sup> Algunos rasgos generales sobre el sistema petrolífero de las cuencas sedimentarias de Colombia.

<sup>52\*\*</sup> Información general de cuencas y rangos para los parámetros básicos usados en la simulación por Monte Carlo

<sup>53</sup> VARGAS JIMENEZ. Óp cit. p.10 (26)

<sup>54</sup> WIKIPEDIA. Cordillera Oriental (Colombia). Colombia. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Cordillera\\_Oriental\\_\(Colombia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Cordillera_Oriental_(Colombia))

Figura 9. Páramo de Guerrero (Adaptado de KIRCHER, 2008)



Posee dos hábitats únicos en el planeta, el bosque Alto Andino y el páramo, encontrando en la zona más de 1500 especies de plantas vasculares (plantas con semillas y helechos). Las orquídeas, los líquenes y el musgo aportan color y textura a estos bosques. Las funciones que cumple el bosque andino es el de regular el aporte de agua que desciende de los páramos. Actualmente por la deforestación estas zonas están en un alto riesgo de amenaza.<sup>55</sup>

En esta zona encontramos varios parques nacionales entre los que se destacan el parque nacional natural Sierra Nevada del Cocuy, el parque nacional natural Páramo de Sumapaz, el parque nacional natural Serranía de los Yariguíes, el

<sup>55</sup> TARDIOLÍ, Myriam. Cordillera Oriental de Colombia: Características, Relieve, Flora, Fauna, Hidrografía. [En línea]. Colombia. Disponible en: <https://www.lifeder.com/cordillera-oriental-colombia/> El Bosque Alto Andino y El Páramo, Flora del Páramo

parque nacional natural Chingaza y el parque nacional natural Tamá, todos protegidos y/o administrados por el SINAP (Sistema Nacional de Área Protegidas).

Respecto a su fauna muchas especies de animales viven exclusivamente en los páramos de la Cordillera Oriental. Son especies endémicas que no se encuentran en otra parte del mundo.

Entre los mamíferos podemos citar la musaraña, el ratón y el curí. De las aves podemos mencionar el rascón o tingua de Bogotá, periquito aliamarillo, y el cucarachero de Apolinar. Hay reptiles como la lagartija, el lagarto collarejo, y la serpiente tierrera. También hay numerosos anfibios como las ranas saltonas, el sapito arlequín, la rana arborícola, la rana fortachona, la rana de cristal y las ranas de lluvia. Entre las nombradas, hay muchas especies que se encuentran amenazadas o en peligro de extinción. Algunas de ellas son el ratón runcho, lobo colorado, oso de anteojos, tigrillo, puma, danta de páramo, soche, guagua loba y tinajo o borugo. También hay aves que están en peligro, el pato rufo, el cóndor de Los Andes, el águila crestada, becasina paramuna o caica, y cotorra montañera.

Prácticamente todos los anfibios nombrados anteriormente están severamente amenazados por la destrucción de su hábitat.<sup>56</sup>

Hidrográficamente es una de las cuencas más ricas del país pues sus páramos destacan la formación de grandes lagunas, como la Laguna de Tota, la Laguna de Ortices, la Laguna de Iguaque, la Laguna de Siecha, la Laguna de Chingaza y la Laguna de Fúquene, a su vez cuenta con los apoyos del río Magdalena, el río Chicamocha, el río Sogamoso, el río Suarez, río Bogotá, río Tunjuelo y entre otras grandes vertientes de la zona.<sup>57</sup>

---

<sup>56</sup> *Ibíd.*

<sup>57</sup> DALTÓNICO. Cordillera Oriental de Colombia. [En línea]. Atlas Geográfico. Colombia. 2013. Disponible en: <https://atlasgeografico.net/cordillera-oriental-de-colombia.html>

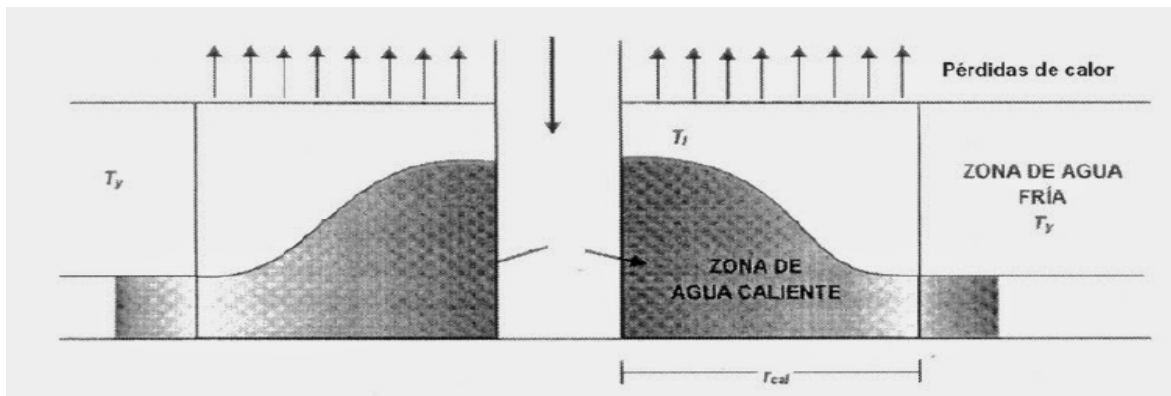
### 3. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE RECObRO

Cada método de recobro requiere de un estudio previo en el cual se definen los espacios en donde se adecuarán las diferentes plantas para los procesos a realizar y los recursos naturales a utilizar junto con la cantidad necesaria de los mismos en el área en donde serán aplicados estos proyectos, cabe destacar que son las variables más importantes en este ámbito ya que si no se cuenta con un espacio adecuado o con la cantidad de recursos necesarios, el método de recobro a aplicar no tendría el éxito esperado.

#### 3.1 INYECCIÓN DE AGUA CALIENTE

Método de recuperación térmica en el cual se inyecta agua caliente en un yacimiento a través de pozos de inyección distribuidos especialmente. La inundación con agua caliente reduce la viscosidad del petróleo crudo, permitiéndole moverse con mayor facilidad hacia los pozos productores<sup>58</sup>, con un factor de recobro que puede llegar hasta el 60%.

Figura 10. Proceso de inyección de agua caliente (Adaptado de PARIS DE FERRER, 2009)

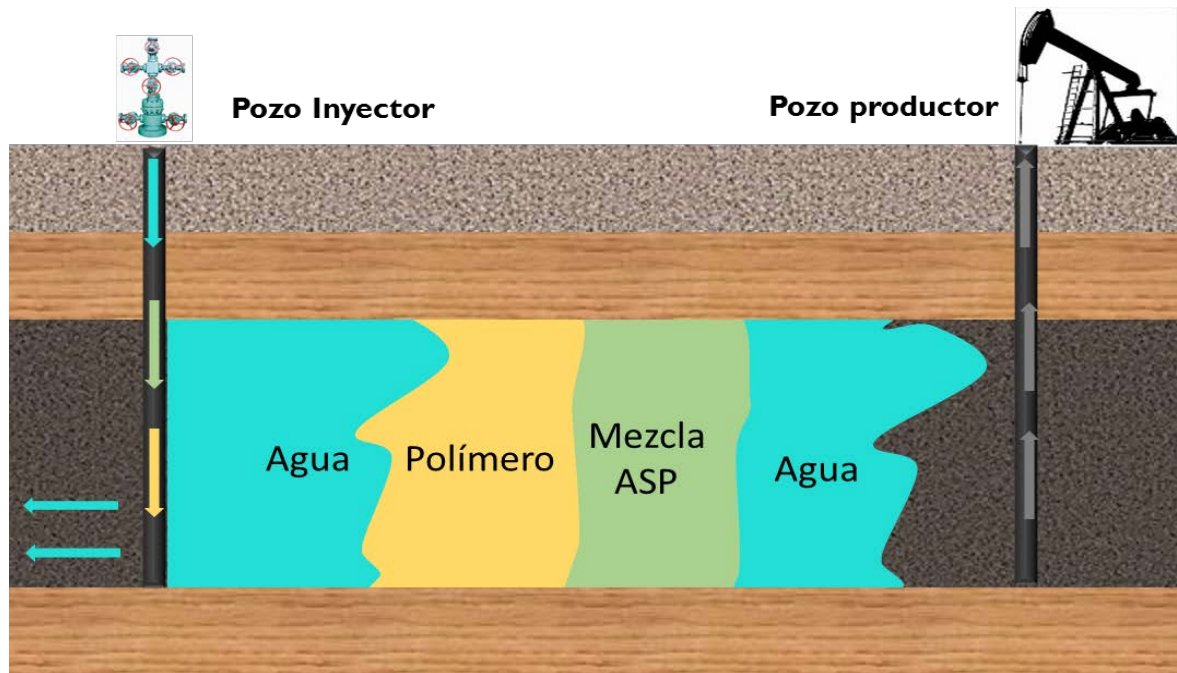


<sup>58</sup>RAMSEY, Mark. Inundación con agua caliente. Oilfield glossary. [En línea]. Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/maincredits.aspx>

### 3.2 ASP (ALCALI-SURFACTANTE-POLIMERO)

Es un método de recobro químico que consiste en la inyección acuosa de tres componentes: alcalino, surfactante y polímero, los cuales generan un factor de recobro entre el 10% y 20%, ya que permite la producción de aceite móvil y atrapado. Por lo general se realiza después de un proceso de inyección de agua.<sup>59</sup>

Figura 11. Proceso de inyección de ASP (Adaptado de PAEZ, LOPEZ, GOMEZ, 2017)



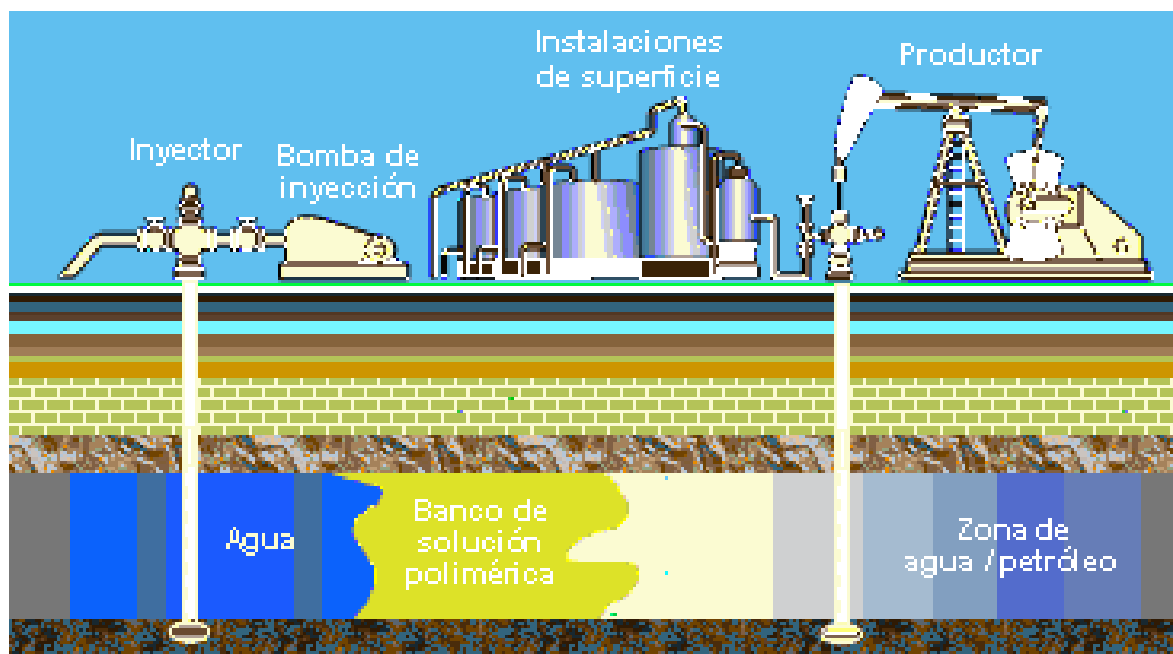
### 3.3 INYECCIÓN DE POLÍMEROS

Consiste en reducir la relación de movilidad agua-petróleo, el mecanismo principal de este proceso es el incremento de la viscosidad de la fase agua para reducir tal relación, por lo que la eficiencia de barrido es incrementada y como una consecuencia, la recuperación de petróleo es mejorada con un factor de recobro entre el 8% y 20%.<sup>60</sup>

<sup>59</sup> RANGEL RENDON, Diego Alencer, HERREÑO, Andrés Rossi, CELY, Juan Camilo. Inyección ASP. Métodos de Recobro. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013

<sup>60</sup> RODRIGUEZ MORENO, Luz Dary, TORRES VEGA, Jhon Edinson y BERMUDEZ POMAREZ Jesús. polímeros. Polymer Flooding: Inyección de Polímeros.2017

Figura 12. Proceso de inyección de polímeros (Adaptado PDVSA-CIED, 1998)

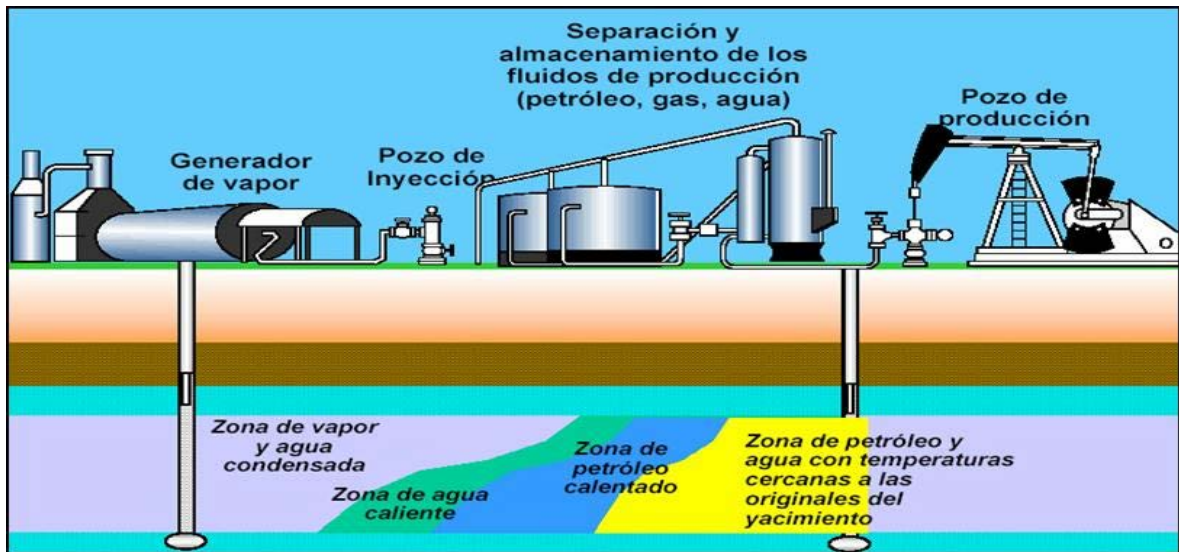


### 3.4 INYECCIÓN CONTINUA DE VAPOR

La inyección continua de vapor es un método de recobro mejorado, aplicado principalmente a crudos pesados. La técnica consiste en la inyección de vapor continuamente al reservorio desde un pozo inyector, con el fin de aumentar la temperatura del petróleo y disminuir su viscosidad para propiciar el flujo hacia un pozo productor. Es utilizado especialmente en yacimientos someros, con arenas de alta permeabilidad o no consolidada. Su factor de recobro puede alcanzar un 40%<sup>61</sup>.

<sup>61</sup> GOMEZ, Luis. Inyección Continua de Vapor. Petróleo America.2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.petroleoamerica.com/2011/02/normal-0-21-false-false-false-es-ve-x.html>

Figura 13. Proceso de inyección continua de vapor (Adaptado de MARTINS, 2001)



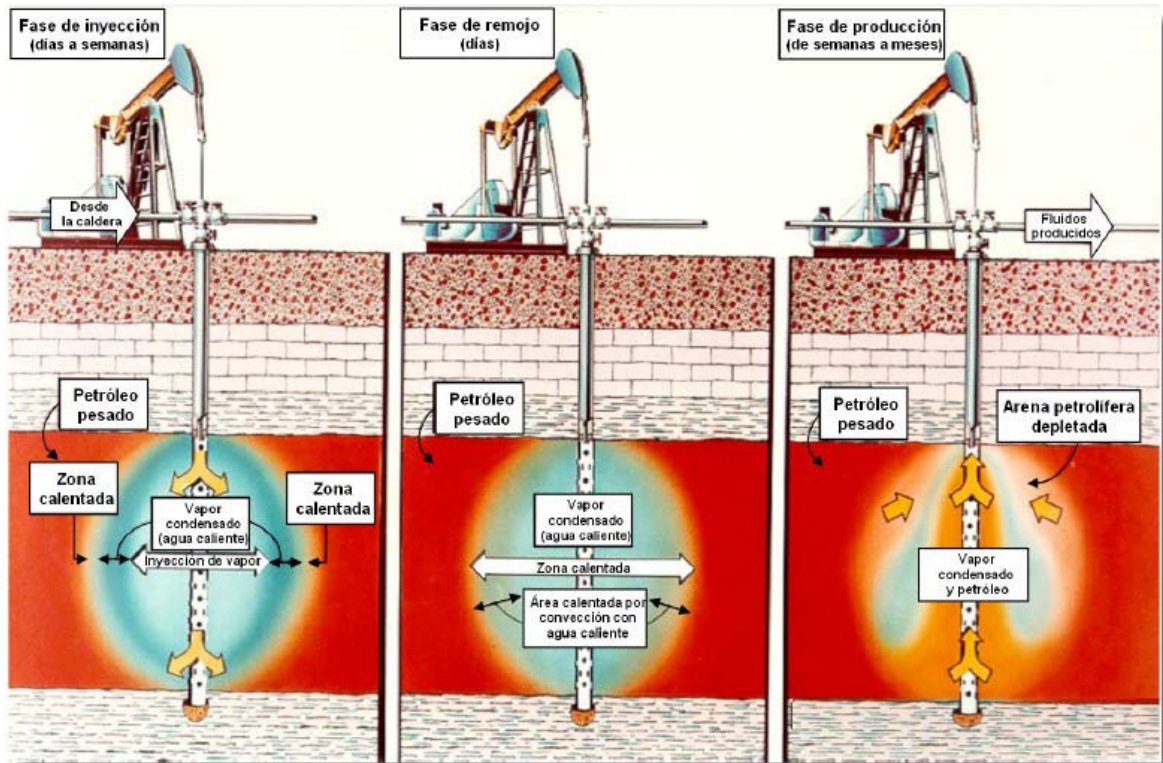
### 3.5 INYECCIÓN CÍCLICA DE VAPOR

Es un método de recobro altamente efectivo para crudos pesados y extra-pesados, en donde se utiliza un mismo pozo para la inyección y producción, este método consta de tres etapas, la primera etapa es la inyección, durante la cual se introduce un tapón de vapor en el yacimiento, la segunda etapa o fase de impregnación, requiere cerrar el pozo durante varios días para permitir una distribución uniforme del calor para diluir el petróleo y así reducir la viscosidad del mismo, por último durante la tercera etapa, se produce el petróleo diluido a través del mismo pozo.<sup>62</sup>

Posteriormente a esto se repite el ciclo tantas veces sean necesarias, aunque se han reportado en algunos casos 22 ciclos, se duda que más de 3 ciclos resulten atractivos comercialmente. Pueden obtener un recobro del 30%.

<sup>62</sup> RAMSEY, Mark. inyección cíclica con vapor. Oilfield glossary. [En línea]. Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/maincredits.aspx>

Figura 14. Proceso de inyección cíclica de vapor (Adaptado de HEAVY OILLOL)

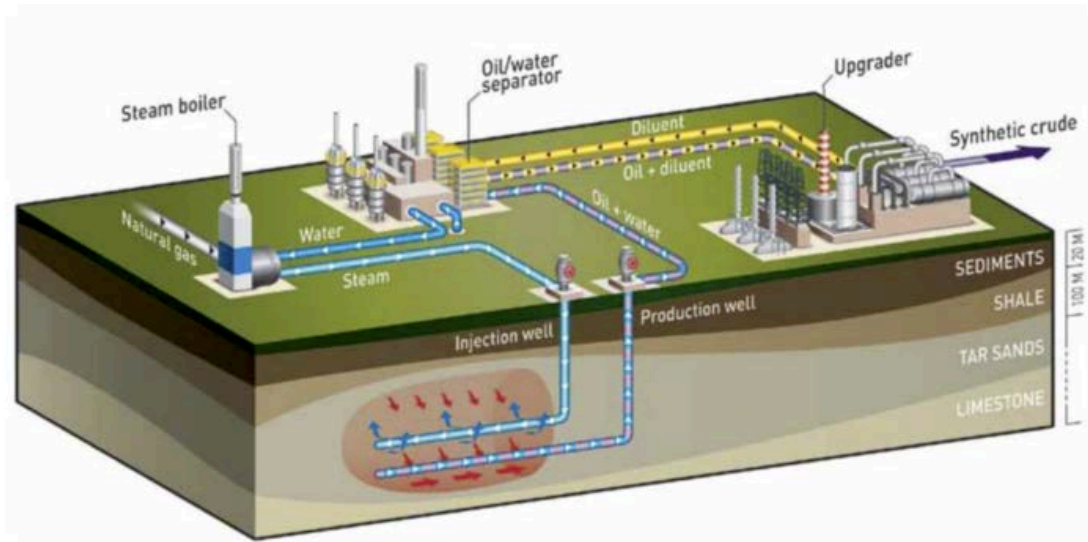


### 3.6 SAGD (DRENAJE GRAVITACIONAL ASISTIDO POR VAPOR)

El proceso de Segregación Gravitacional Asistida por Vapor (SAGD), usa un par de pozos horizontales paralelos, donde el pozo superior inyecta vapor continuamente y el pozo inferior es productor. El calor licúa el crudo, el cual puede fluir hacia el pozo productor; este junto con el agua condensada del vapor, fluyen hacia la cabeza del pozo. Pudiendo obtener una recuperación superior al 70%.<sup>63</sup>

<sup>63</sup> MONTER GARCÍA, Francisco. Segregación gravitacional asistida por vapor, proceso SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage). Tesis de grado, en mención Ingeniero de petroleos. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2010. p 13

Figura 15. SAGD (Adaptado de OIL SANDS MAGAZINE, 2016)

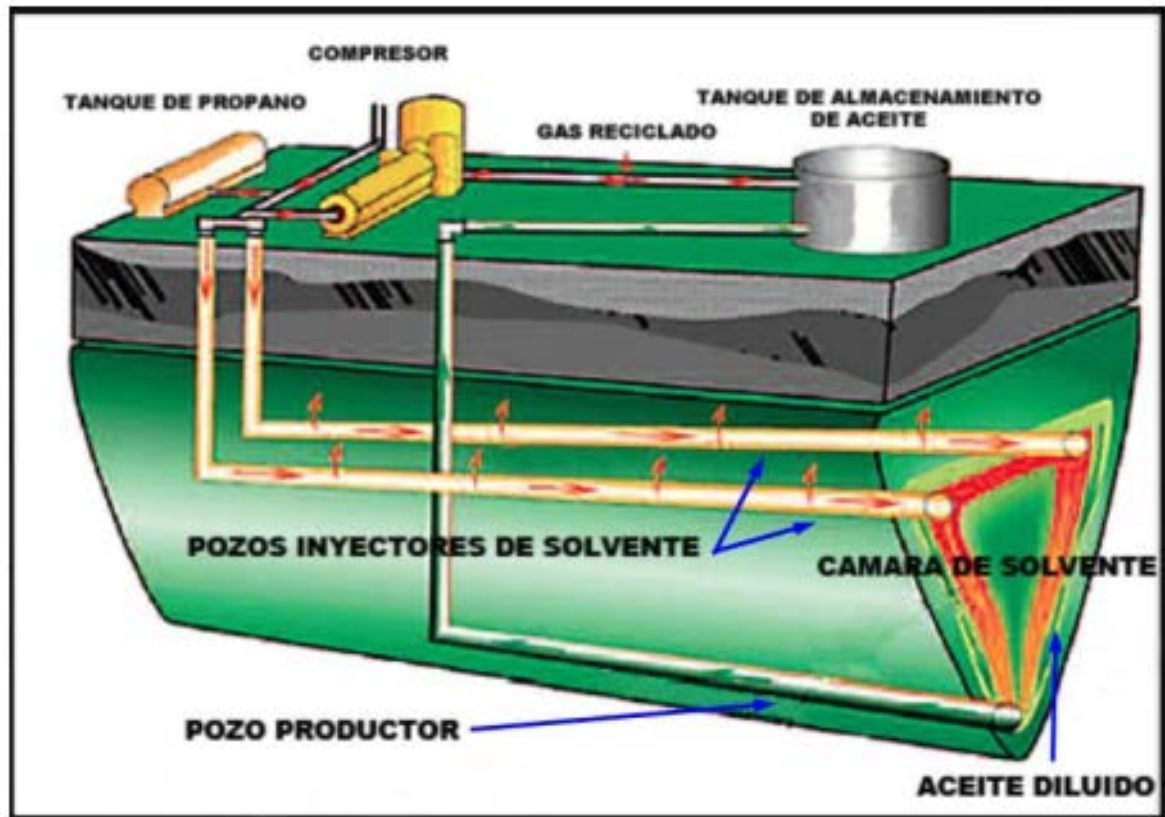


### 3.7 VAPEX

Es un método de recobro no térmico usado en lugares donde el SAGD no es rentable, debido a que tienen un concepto similar. Consiste en la inyección de un solvente que expande y diluye el petróleo por contacto, funcionando a temperatura de yacimiento. El petróleo diluido se drena por gravedad. Alcanzan a tener un factor de recobro del 50%.<sup>64</sup>

<sup>64</sup> FLORES BARROSO y MARÍN RANGEL. Óp cit.

Figura 16. Proceso de VAPEX (Adaptado de VAPEX, 2017)



### 3.8 NECESIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES PARA LOS MÉTODOS DE RECOBRO

Respecto al proceso de cada método anteriormente descrito y al análisis de equipos o necesidades requeridas, se presenta de manera general los recursos necesarios para su desarrollo.

**3.8.1 Recurso hídrico:** El agua utilizada para cada método de recobro proviene de: acuíferos, agua de producción tratada, ríos cercanos, aguas lluvia o acueductos municipales.

Para los métodos en estudio y la variante que se está presentando de cada uno de ellos, todos a excepción del VAPEX hacen uso del recurso hídrico. Si se hiciera

una comparación teniendo en cuenta un proyecto con las mismas condiciones, se podría decir que la inyección de agua caliente, la inyección continua de vapor, la inyección cíclica de vapor y SAGD generan mayor presión sobre este recurso, ya que la pureza del agua para inyección y generación de vapor impiden el uso de aditivos que aumenten la mezcla como en la inyección de polímeros y ASP, y la manera en que se hacen las inyecciones (verticalmente) también disminuye el alcance del frente de inyección, contrario a las inyecciones de manera horizontal.

**3.8.2 Uso del suelo:** Para cada método de recobro varia el uso del suelo, esto depende de: cantidad de pozos nuevos a perforar (inyección o producción), cantidad y tamaño de equipos para tratamiento de agua, crudo y gas, el transporte de los fluidos, bien sea por tubería o vehículos (adaptación o construcción de vías), zonas de almacenamiento para los fluidos producidos y de inyección, y por ultimo las zonas de operación y descanso para los trabajadores. Hay que destacar que los equipos que requieren de la generación de vapor y una mejor calidad del mismo como lo son la inyección continua de vapor, la inyección cíclica de vapor, VAPEX y SAGD harán una mayor presión sobre este recurso.

### **3.9 GENERACIÓN DE RESIDUOS**

Cada método analizado genera residuos sólidos, líquidos y gaseosos, los cuales deben ser tratados según las normas ambientales del país, para evitar que al ser dispuestos generen mayores problemas. A continuación de manera general y basada en los procesos de cada método de recobro, se agruparán según el residuo que se genera en mayor cantidad, y el que probablemente tenga el mayor efecto contaminante.

**3.9.1 Residuos líquidos:** dentro de los métodos estudiados se encuentra que la inyección de agua caliente, la inyección continua de vapor, la inyección cíclica de vapor, la inyección de polímeros y la inyección ASP, generan una gran cantidad de

residuos líquidos que contiene: aceite disperso, metales pesados, químicos de tratamiento, gases disueltos, bacterias, material radioactivo, sólidos producidos, minerales disueltos y trazas de contaminantes (polímero, surfactante, álcali, etc.) debido a la naturaleza del proceso y al contacto entre las soluciones inyectadas y los líquidos en fondo o la misma formación de interés.

**3.9.2 Residuos sólidos:** en cuanto a generación de residuos no existe un método que predomine sobre los demás, todos los métodos generan residuos sólidos (minerales y metales en suspensión, sólidos provenientes de la misma roca de formación, crudo que se pueda solidificar en el proceso de producción), pero la cantidad de estos va a depender del aumento o disminución de la presión de inyección y del grado de compactación y litificación de la roca de la formación.

**3.9.3 Emisiones atmosféricas:** los residuos gaseosos que se emiten a la atmósfera se dan con mayor frecuencia durante el desarrollo de proyectos como la inyección cíclica y continua de vapor, SAGD y VAPEX, ya que, en el momento de la interacción del vapor inyectado con el crudo de subsuelo, se pueden obtener gases ricos en metano, propano, etano u otros volátiles, los cuales saldrán a superficie durante la producción, además del H<sub>2</sub>S que se produce dependiendo del yacimiento. Es importante explicar que el grado de contaminación atmosférica que generan estos métodos no solo se debe a los gases del subsuelo sino también a las emisiones que se dan durante la generación y compresión del vapor necesario para la inyección, lideradas por el CO<sub>2</sub>.

## 4. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LOS IMPACTOS

Los métodos de recobro citados anteriormente requieren del uso de recursos naturales así como del aprovechamiento de espacios en zonas que son consideradas reservas naturales, que están protegidas por grupos ambientales, o son de importancia ambiental, por tal motivo entender y aclarar su funcionamiento permitirá conocer la interacción que estos tendrán con el medio ambiente y el daño o problema que allí puedan causar, todo esto se verá reflejado a través de un análisis ambiental general para cada método.

El análisis hecho contiene la identificación de los impactos ambientales (físico-bióticos) ya mencionados y su posterior evaluación, la cual fue hecha con base en factores seleccionados y cuantificados según el criterio de los autores.

El principal objetivo de la evaluación es priorizar los impactos negativos para definir qué método causa mayor impacto ambiental y así mismo cual requiere de mayor manejo ambiental, por esta razón los impactos sociales y de carácter positivo no serán evaluados.

### 4.1 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

La identificación de impactos considera los impactos físico-bióticos causados por las actividades propias de los proyectos en el área donde se llevan a cabo y áreas cercanas con posible influencia.

**4.1.1 Metodología de identificación de impactos ambientales.** La identificación de los impactos ambientales asociados a la realización de las actividades se realizó teniendo en cuenta la secuencia ETAPA- ACTIVIDAD- IMPACTO.

**ETAPA:** se denomina etapa a cada una de las fases del proyecto que agrupa las actividades requeridas para llevar a cabo la ejecución del mismo. Para definir las etapas se tuvo en cuenta el orden de aparición de cada actividad.

**ACTIVIDAD:** procesos, acciones o procedimientos realizados en cada una de las etapas del proyecto que al interactuar con el medio ambiente puede causar algún tipo de impacto sobre el componente físico-biótico.

**IMPACTO:** es el cambio en este caso perjudicial sobre el componente biofísico del medio ambiente, generado por las actividades del proyecto.

**4.1.2 Metodología de calificación de impactos ambientales.** Para este caso la calificación de los impactos es semi-cuantitativa ya que aunque la evaluación de las variables se hace de manera cualitativa (subjetiva), las opiniones de los evaluadores se convierten en un número por medio de rangos que permiten realizar operaciones matemáticas entre variables y al final obtener un consolidado de la evaluación, comparable entre los tipos de proyectos a evaluar. De otra parte, solo se calificaron impactos negativos sobre el medio ambiente, ya que los positivos no se consideraron determinantes para la evaluación del método más viable ambientalmente.

**4.1.2.1 Calificación semi-cuantitativa.** La calificación cuantitativa de impactos ambientales se mide por el I.I.A (índice de impacto ambiental) y se obtiene al descomponer el impacto en sus factores característicos a saber: probabilidad, cobertura, grado de recuperación y duración, la interacción de dichos factores determina la calificación del impacto.

La calificación se realizó con el propósito de transformar una opinión subjetiva, basada en el criterio de los autores, en un número que permita correlacionar los

factores ya descritos y obtener una medida relativa de la gravedad del impacto evaluado.

A continuación, se describen cada uno de los factores tenidos en cuenta para la calificación del índice de impacto ambiental de cada actividad:

- **PROBABILIDAD DE QUE OCURRA (Pr)**

Califica el grado de certeza de que ocurra el impacto a causa de la actividad evaluada.

Tabla 8. Rango de probabilidad

RANGO	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE
<b>MUY PROBABLE</b>	Pese a que no hay una certeza absoluta de que se presente el impacto, existe un alto riesgo de ocurrencia.	1
<b>PROBABLE</b>	Existe la posibilidad de que se genere el impacto.	0,7
<b>POCO PROBABLE</b>	El riesgo de que se presente el impacto es mínimo.	0,3

- **COBERTURA (Cob)**

La cobertura establece los límites espaciales de la afectación causada por el impacto.

Tabla 9. Rango de cobertura

RANGO	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE
<b>PUNTUAL</b>	Cuando la acción impactante produce un efecto muy localizado en el medio, es decir en un espacio muy reducido dentro del área de influencia directa.	1
<b>LOCAL</b>	Cuando el impacto se presenta dentro del área de influencia directa del proyecto, pero en un área amplia.	2
<b>REGIONAL</b>	Cuando el impacto supera los límites del área de influencia directa del proyecto.	3

- **GRADO DE RECUPERACIÓN (GRec)**

Define si los cambios generados sobre el medio pueden ser asimilados por él mismo o si necesitan la intervención de actividad humana para su recuperación, y cuanto tiempo tarda dicha recuperación.

Tabla 10. Rango de recuperación

RANGO	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE
<b>REVERSIBLE A CORTO PLAZO</b>	Posibilidad de retornar por medios naturales a las condiciones iniciales previas a la acción que generó la alteración, en un plazo inferior a un año.	1
<b>REVERSIBLE A LARGO PLAZO</b>	Posibilidad de retornar por medios naturales a las condiciones iniciales previas a la acción que generó la alteración, en un plazo superior a un año.	2
<b>IRREVERSIBLE</b>	Imposibilidad o dificultad extrema de retornar por medios naturales o antrópicos a las condiciones iniciales previas a la acción que generó la alteración.	4

- **DURACIÓN (D)**

Hace referencia al tiempo que permanece activo el aspecto o actividad generador del impacto.

Tabla 11. Rango de duración

RANGO	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE
<b>TEMPORAL</b>	Cuando el aspecto generador del impacto permanece activo del 20 al 80% del tiempo total del proyecto.	1
<b>CORTA DURACIÓN</b>	Cuando la permanencia del aspecto generador de la alteración es inferior al 20% del tiempo total del proyecto.	2
<b>LARGA DURACIÓN</b>	Cuando la permanencia del aspecto generador de la alteración es superior al 80% del tiempo total del proyecto.	3

- **INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)**

Es el resultado obtenido después de la interacción de los anteriores factores a través de la siguiente ecuación:

$$I.I.A. = Pr (Cob + GRec + D) (1)$$

El índice de importancia ambiental puede variar entre de 1 y 10, de esta manera el impacto se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 12. Clasificación del I.I.A.

IMPORTANCIA AMBIENTAL	CALIFICACIÓN	COLOR
Bajo	1 a 3.9	Verde
Medio	4 a 6	Amarillo
Medio – Alto	6.1 a 7	Naranja
Alto	> 7	Rojo

## 4.2 MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

Habiendo definido ya como se calificarán los impactos creados por las actividades propias de los proyectos, procedemos a mostrar las matrices de calificación para cada uno de los métodos y adicional a estas unas graficas que nos permitan visualizar de mejor manera los resultados.

**4.2.1 Inyección de agua caliente.** La siguiente es la matriz correspondiente a la evaluación de impactos ambientales generados por cada actividad propia del método de recobro inyección de agua caliente.

Tabla 13. Matriz de evaluación de impactos ambientales – inyección de agua caliente.

IMPACTOS	ACTIVIDADES																	
		Deterioro de la malla vial	Modificación del paisaje	Ahuymamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación de hábitats de fauna silvestre	Incremento de radicación térmica y luminosa	Aumento de niveles de intensidad sonora	Contaminación atmosférica (emisiones)	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Contaminación del agua superficial	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Cambio en el uso actual del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Contaminación del suelo	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	Incremento en la susceptibilidad a la erosión
	Construcción de vías, piscinas, tanques y laboratorios, adecuación del terreno para ubicación de equipos nuevos		X	X	X	X	X						X	X	X	X	X	
	Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos equipos y máquinas			X	X	X	X									X	X	X
	Perforación y completamiento de pozos				X	X	X							X	X	X	X	X
	Captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto						X	X				X						
	Tratamiento de agua a inyectar (calentar)												X	X				
	Pruebas piloto										X						X	
	Inyección de agua										X						X	

IMPACTOS	ACTIVIDADES						
		Generación residuos líquidos y sólidos	Tratamiento de emulsiones	Tratamiento de agua de producción	Tratamiento de residuos líquidos por vaporación	Disposición de sólidos de producción	Disposición de agua de producción
	Deterioro de la malla vial						
	Modificación del paisaje						
	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre					X	X
	Modificación de hábitats de fauna silvestre					X	X
	Incremento de radiación térmica y luminosa		X	X			
	Aumento de niveles de intensidad sonora		X	X			
	Contaminación atmosférica (emisiones)		X	X	X		
	Afectación de cuerpos de agua subterránea						X
	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales						X
	Cambio en las características físicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea					X	X
	Contaminación del agua superficial						X
	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)						
	Cambio en el uso actual del suelo						
	Pérdida de capa orgánica del suelo						
	Contaminación del suelo					X	X
	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno						
	Incremento en la susceptibilidad a la erosión						

Luego de identificar y evaluar los impactos que se desarrollan por cada actividad del proyecto se debe dar una calificación a cada uno para poder ordenarlos según su gravedad.

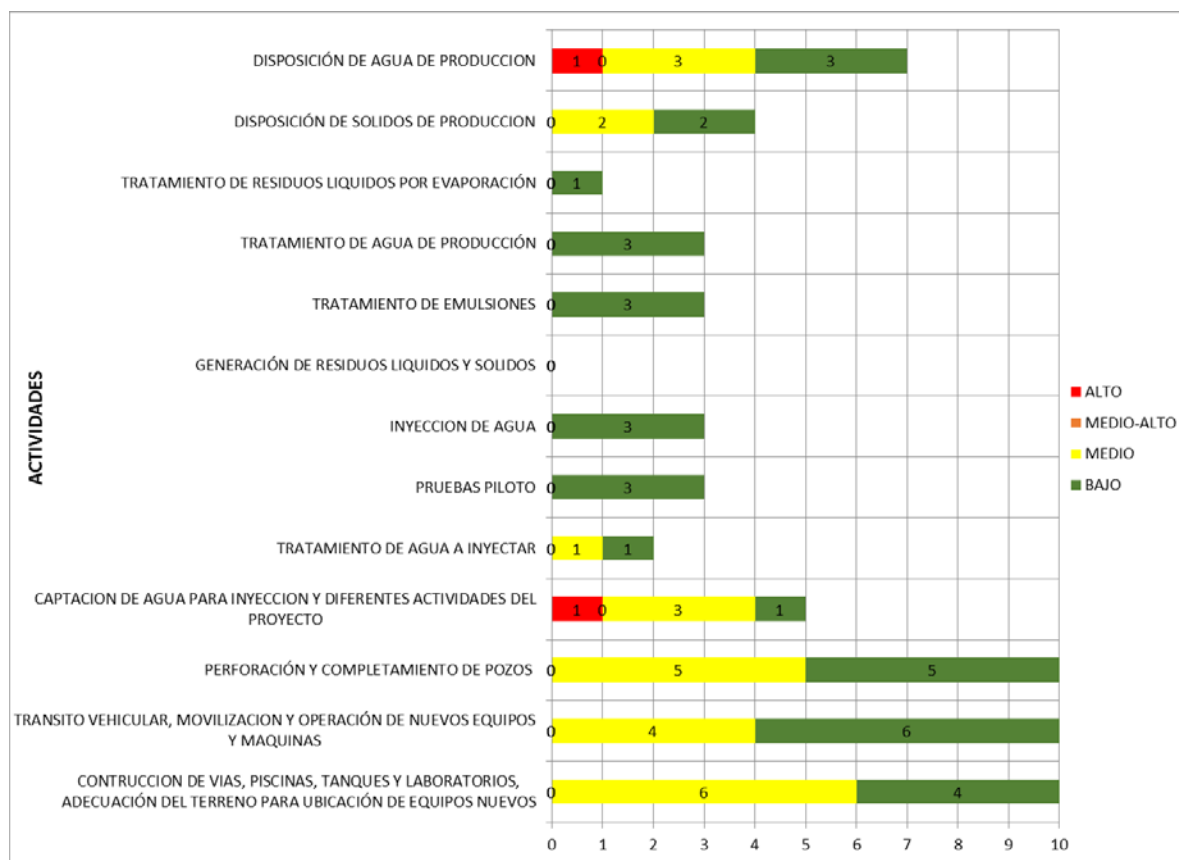
Tabla 14. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de Agua Caliente

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Incremento en la susceptibilidad a la erosión	0.3	1	1	2	1.2
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	0.3	1	1	2	1.2
Contaminación del suelo	0.3	1	2	2	1.5
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	2	3	6
Cambio en el uso actual del suelo	1	1	2	3	6
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	1	3	2	3	8
Contaminación del agua superficial	1	3	2	3	8
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.3	1	2	1	1.2
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	3	2	3	5.6
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	2	1.5
Contaminación atmosférica (emisiones)	0.3	1	1	3	1.5
Aumento de niveles de intensidad sonora	0.7	1	1	3	3.5
Incremento en la radiación térmica y luminosa	1	1	1	3	5
Modificación de hábitats de fauna silvestre	1	1	2	3	6

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	1	1	2	3	6
Modificación del paisaje	1	1	2	3	6
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 1. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección de agua caliente



**4.2.1.1 Análisis ambiental – Inyección de agua caliente.** Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

El recurso con mayor afectación es el hídrico, esto debido a dos actividades, la captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto y la disposición de agua de producción. Estas actividades tienen un número menor de impactos respecto a otras actividades del proyecto, pero dichos impactos causan mayor afectación, debido a que tienen un índice de impacto ambiental (I.I.A) más alto.

**4.2.2 Inyección de ASP (Alcali-Polímero-Surfactante).** La siguiente es la matriz correspondiente a la evaluación de impactos ambientales generados por cada actividad propia del método de recobro ASP (ALCALI-POLIMERO-SURFACTANTE).

Tabla 15. Matriz de evaluación de impactos ambientales – ASP (Alcali-Polímero-Surfactante)

IMPACTOS	Incremento en la susceptibilidad a la erosión	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	Contaminación del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Cambio en el uso actual del suelo	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Contaminación atmosférica (emisiones)	Aumento de niveles de intensidad sonora	Incremento de radiación térmica y luminosa	Modificación de hábitats de fauna silvestre	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación del paisaje	Deterioro de la malla vial
Construcción de vías, piscinas, tanques y laboratorios, adecuaciones del terreno para ubicación de quipos nuevos			X	X	X				X	X	X	X	X	X	
Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos quipos y máquinas	X		X	X					X	X	X	X	X	X	X
Perforación y completamiento de pozos	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	
Captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto						X		X				X	X		
Tratamiento de agua para la solución ASP										X					
Preparación de la solución ASP										X					
Pruebas piloto		X	X							X			X		
Inyección de la		X	X							X			X		

IMPACTOS	ACTIVIDADES	solución ASP						
		Generación de residuos líquidos y sólidos	Tratamiento de emulsiones	Tratamiento de residuos líquidos por evaporación	Tratamiento de agua de producción	Disposición de sólidos de producción	Disposición de líquidos de producción	
Deterioro de la malla vial								
Modificación del paisaje								
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre								
Modificación de hábitats de fauna silvestre								
Incremento de radiación térmica y luminosa			X					
Aumento de niveles de intensidad sonora			X					
Contaminación atmosférica (emisiones)			X					
Afectación de cuerpos de agua subterránea								
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales								
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea								
Contaminación del agua superficial							X	
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)								X
Cambio en el uso actual del suelo								
Pérdida de capa orgánica del suelo							X	
Contaminación del suelo							X	
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno								
Incremento en la susceptibilidad a la erosión								

Luego de identificar y evaluar los impactos que se desarrollan por cada actividad del proyecto se debe dar una calificación a cada uno para poder ordenarlos según su gravedad.

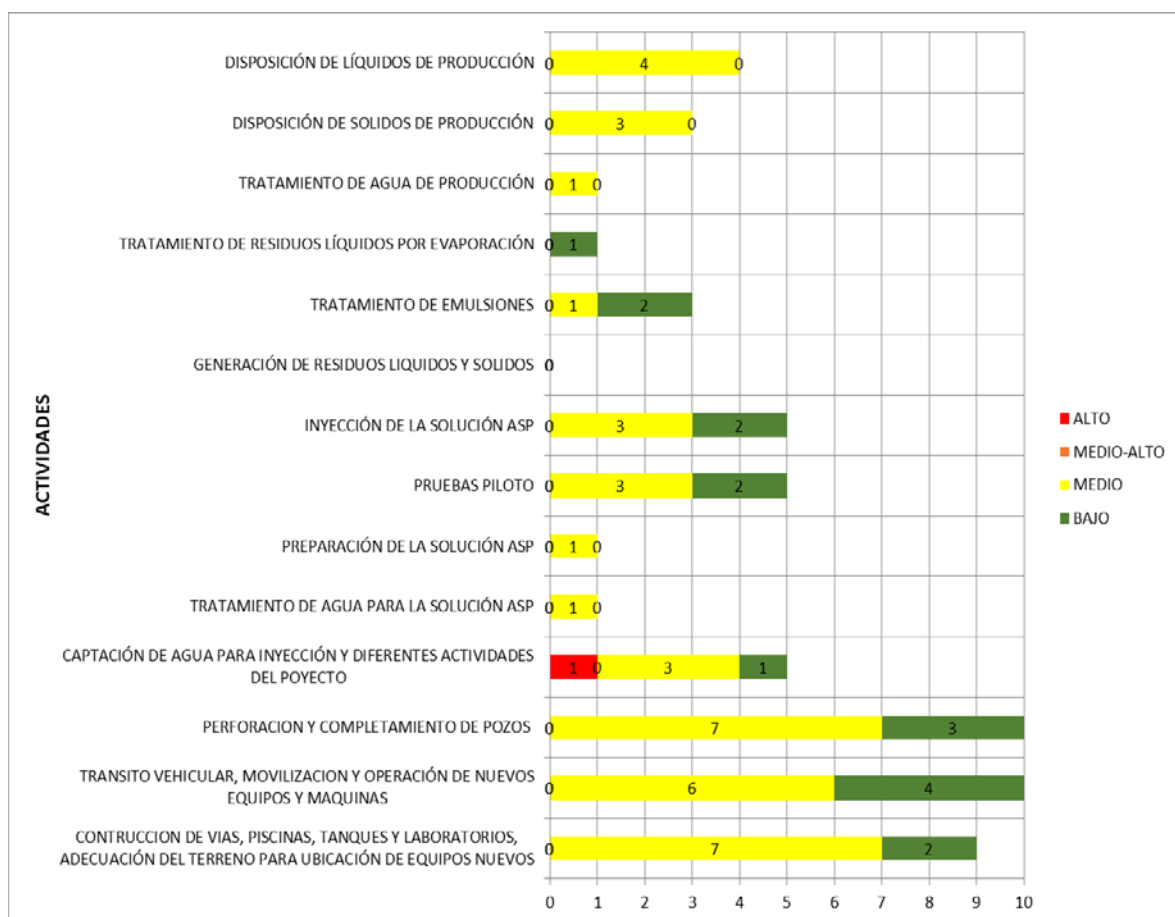
Tabla 16. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de ASP (Alcali-Polímero-Surfactante)

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Incremento en la susceptibilidad a la erosión	0.3	1	1	2	1.2
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	0.3	1	1	2	1.2
Contaminación del suelo	0.7	1	2	3	4.2
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	2	3	6
Cambio en el uso actual del suelo	1	1	2	3	6
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	1	3	2	3	8
Contaminación del agua superficial	0.7	2	2	3	4.9
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.3	1	2	3	1.8
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	3	2	3	5.6
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	2	1.5
Contaminación atmosférica (emisiones)	0.3	1	1	3	1.5
Aumento en los niveles de intensidad sonora	0.7	1	2	3	4.2
Incremento en la radiación térmica y luminosa	0.3	1	1	3	1.5
Modificación de hábitats de fauna	1	1	2	3	6

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
silvestre					
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	1	1	2	3	6
Modificación del paisaje	1	1	2	3	6
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 2. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – ASP.



**4.2.2.1 Análisis ambiental-ASP (Alcali-Polímero-Surfactante).** Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

Las actividades descritas anteriormente para este método generan en su mayoría impactos de carácter medio, pero se mantiene una alta presión sobre el recurso hídrico, a su vez el proceso permite que haya una menor contaminación por disposición de residuos líquidos respecto a los componentes ASP, ya que estos en su mayoría se quedan alojados dentro del yacimiento y se obtendrán líquidos de producción (Agua, crudo y residuos sólidos) los cuales pasaran a su tratamiento respectivo y a su vez serán acondicionados según los criterios ambientales. Las actividades con un mayor número de impactos que son MEDIO y BAJO están dentro de procesos primarios que son fundamentales para el desarrollo del proyecto.

**4.2.3 Inyección de polímeros.** La siguiente es la matriz correspondiente a la evaluación de impactos ambientales generados por cada actividad propia del método de recobro inyección de polímeros.

Tabla 17. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de polímeros

IMPACTOS	Incremento en la susceptibilidad a la erosión	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	Contaminación del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Cambio en el uso actual del suelo	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Contaminación del agua superficial	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Contaminación atmosférica (emisiones)	Aumento de niveles de intensidad sonora	Incremento de radiación térmica y luminosa	Modificación de hábitas de fauna silvestre	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación del paisaje	Deterioro de la malla vial	ACTIVIDADES
																		Construcción de vías, piscinas, tanques y laboratorio, adecuaciones del terreno para la ubicación de equipos nuevos
			X	X	X						X	X	X	X	X	X		Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos equipos y Maquinas
	X	X	X	X	X							X	X	X	X	X		Perforación de pozos
						X			X	X				X	X			Captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto
												X						Tratamiento de agua a inyectar
												X						Preparación de solución polimérica
		X							X			X		X	X	X		Pruebas piloto

<b>Inyección de solución polimérica</b>		X	X					X									
<b>Generación de residuos líquidos y sólidos</b>																	
<b>Tratamiento de emulsiones</b>										X	X	X					
<b>Tratamiento de agua de producción</b>										X	X	X					
<b>Tratamiento de residuos líquidos por evaporación</b>										X							
<b>Disposición de sólidos de producción</b>			X				X							X			
<b>Disposición de líquidos de producción</b>			X				X							X			

Luego de identificar y evaluar los impactos que se desarrollan por cada actividad del proyecto se debe dar una calificación a cada uno para poder ordenarlos según su gravedad.

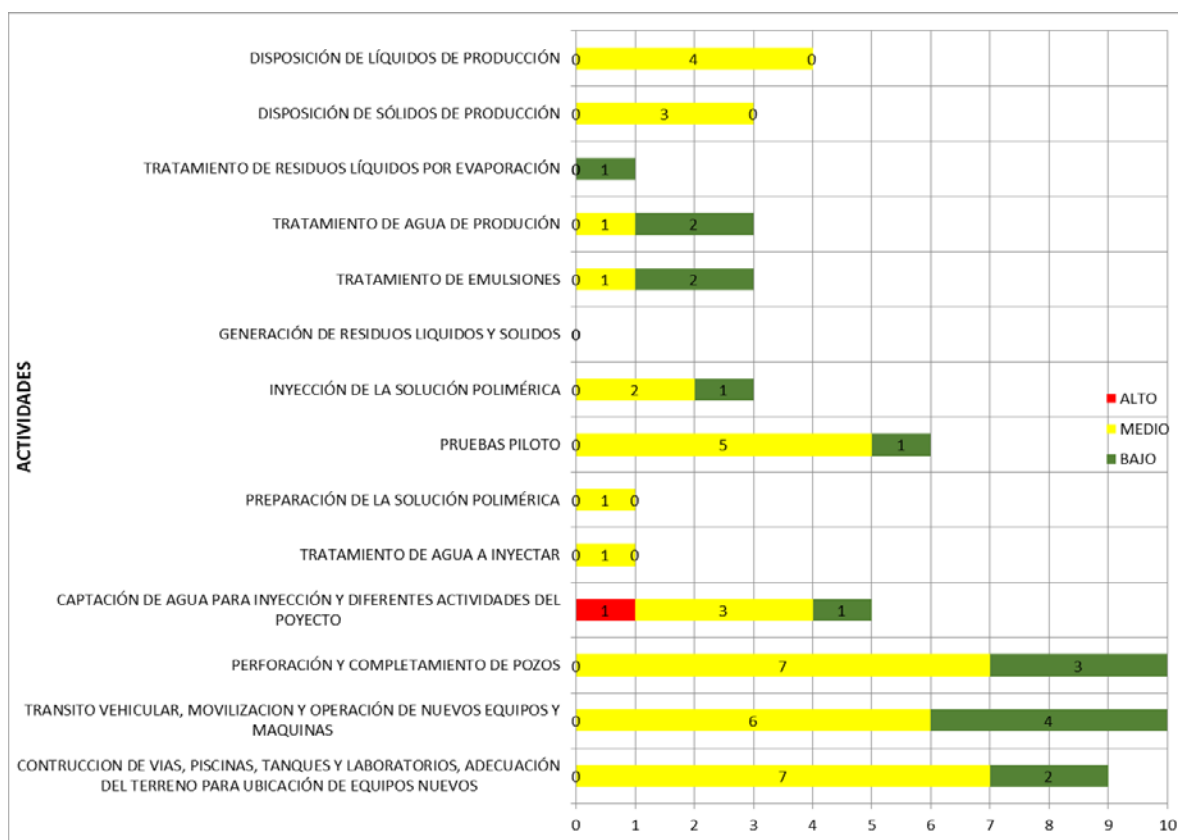
Tabla 18. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección de polímeros

<b>IMPACTOS</b>	<b>PROBABILIDAD</b>	<b>COBERTURA</b>	<b>GRADO DE RECUPERACION</b>	<b>DURACION</b>	<b>INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)</b>
Incremento en la susceptibilidad a la erosión	0.3	1	1	2	1.2
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	0.3	1	1	2	1.2
Contaminación del suelo	0.7	1	2	3	4.2
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	2	3	6
Cambio en el uso actual del suelo	1	1	2	3	6
Presión sobre el	1	3	2	3	8

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
recurso hídrico (disponibilidad)					
Contaminación del agua superficial	0.7	2	2	3	4.9
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.7	1	2	3	4.2
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	3	2	3	5.6
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	2	1.5
Contaminación atmosférica (emisiones)	0.3	1	1	3	1.5
Aumento en los niveles de intensidad sonora	0.7	1	2	3	4.2
Incremento en la radiación térmica y luminosa	0.3	1	1	3	1.5
Modificación de hábitats de fauna silvestre	1	1	2	3	6
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	1	1	2	3	6
Modificación del paisaje	1	1	2	3	6
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 3. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección de polímeros.



**4.2.3.1 Análisis ambiental-Inyección de polímeros.** Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

Requiere de una alta presión sobre el recurso hídrico, y como se observa la mayoría de impactos en cuanto a este proyecto son de calificación MEDIA.

Los tratamientos eficientes y el fluido a tratar (Agua, crudo y solidos) dan como resultado un bajo impacto, pero su disposición genera impactos de mayor relevancia ya que hay un contacto directo con el medio. Las actividades con un mayor número de impactos que son MEDIO y BAJO están dentro de procesos primarios que son fundamentales para el desarrollo del proyecto.

**4.2.4 Inyección continua de vapor.** La siguiente es la matriz correspondiente a la evaluación de impactos ambientales generados por cada actividad propia del método de recobro inyección continua de vapor.

Tabla 19. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección continua de vapor

IMPACTOS	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	Incremento en la susceptibilidad a la erosión	Contaminación del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Cambio en el uso actual del suelo	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Contaminación del agua superficial	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Contaminación atmosférica (emisiones)	Aumento de niveles de intensidad sonora	Incremento de radiación térmica y luminosa	Modificación de hábitats de fauna silvestre	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación del paisaje	Deterioro de la malla vial
Construcción de vías, piscinas, tanques y laboratorios, adecuación del terreno para ubicación de equipos nuevos			X	X	X						X	X	X	X	X	X	
Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos equipos y maquinas		X	X	X							X	X	X	X	X	X	X
Perforación de pozos	X	X	X	X	X							X	X	X	X	X	
Captación de agua para inyección y diferentes						X			X	X				X	X		



Luego de identificar y evaluar los impactos que se desarrollan por cada actividad del proyecto se debe dar una calificación a cada uno para poder ordenarlos según su gravedad.

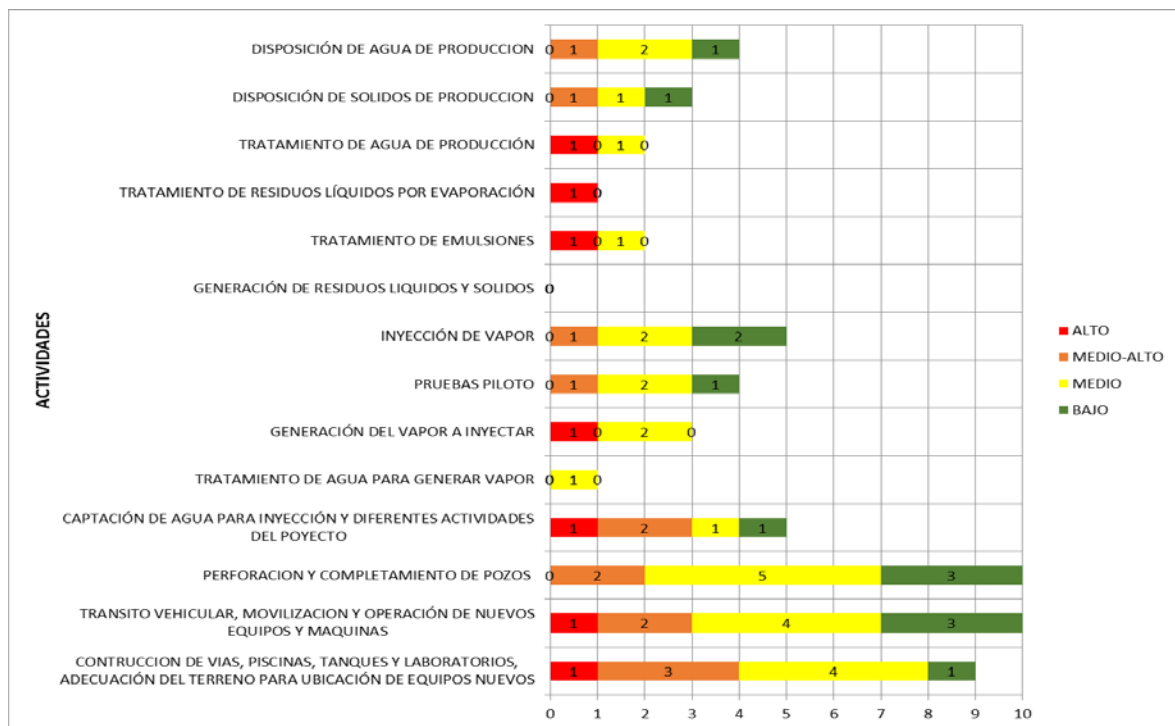
Tabla 20. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección continua de vapor

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Incremento en la susceptibilidad a la erosión	0.3	1	1	2	1.2
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	0.3	1	1	2	1.2
Contaminación del suelo	0.3	1	1	2	1.2
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	1	2	4
Cambio en el uso actual del suelo	1	2	2	3	7
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	1	3	2	3	8
Contaminación del agua superficial	0.7	1	2	3	4.2
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.3	1	2	3	1.8
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	2	2	3	4.9
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	1	1.2
Contaminación atmosférica (emisiones)	1	3	2	3	8
Aumento en los niveles de intensidad sonora	0.7	1	2	2	3.5
Incremento en la	1	1	1	3	5

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
radiación térmica y luminosa					
Modificación de habitas de fauna silvestre	1	2	2	3	7
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	1	2	2	3	7
Modificación del paisaje	1	1	2	3	6
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 4. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección continua de vapor.



**4.2.4.1 Análisis ambiental-Inyección continua de vapor.** Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

Para generar las cantidades requeridas de vapor es necesaria una gran cantidad de agua, por lo tanto, la presión sobre el recurso hídrico es alta, así como su índice de impacto ambiental (I.I.A), a su vez la generación del vapor a inyectar genera altas emisiones de gases (CO<sub>2</sub>) provocando un impacto ambiental considerable.

El impacto del uso del suelo puede variar dependiendo de la cantidad y tamaño de los equipos a utilizar en superficie, ya sean facilidades, bombas para transporte e inyección de vapor, vías, laboratorios o equipos nuevos.

Los gases ricos (Metano, etano u otros volátiles) que se generan por la interacción entre el vapor inyectado y los fluidos de formación son producidos, lo cual implica que durante el tratamiento deba haber un mayor cuidado para separarlos y disponer de ellos.

Las actividades de con un alto número de impactos que son MEDIO y BAJO están dentro de procesos primarios que son fundamentales para el desarrollo del proyecto.

**4.2.5 Inyección cíclica de vapor.** La siguiente es la matriz correspondiente a la evaluación de impactos ambientales generados por cada actividad propia del método de recobro inyección cíclica de gas.

Tabla 21. Matriz de evaluación de impactos ambientales – Inyección cíclica de vapor

IMPACTOS	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	Incremento en la susceptibilidad a la erosión	Contaminación del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Cambio en el uso actual del suelo	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Contaminación del agua superficial	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Contaminación atmosférica (emisiones)	Aumento de niveles de intensidad sonora	Incremento de radiación térmica y luminosa	Modificación de hábitats de fauna silvestre	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación del paisaje	Deterioro de la malla vial	ACTIVIDADES
			X	X	X						X	X	X	X	X	X		Construcción de vías, piscinas, tanques y laboratorios, adecuación del terreno para ubicación de equipos nuevos
		X	X	X							X	X	X	X	X	X	X	Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos quipos y maquinas
		X	X	X	X							X	X	X	X	X		Perforación y completamiento de pozos
						X			X	X				X	X			Captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto
												X						Tratamiento de agua para generar vapor
												X	X					Generación de vapor a inyectar
												X			X			Pruebas piloto
												X			X			Inyección de vapor



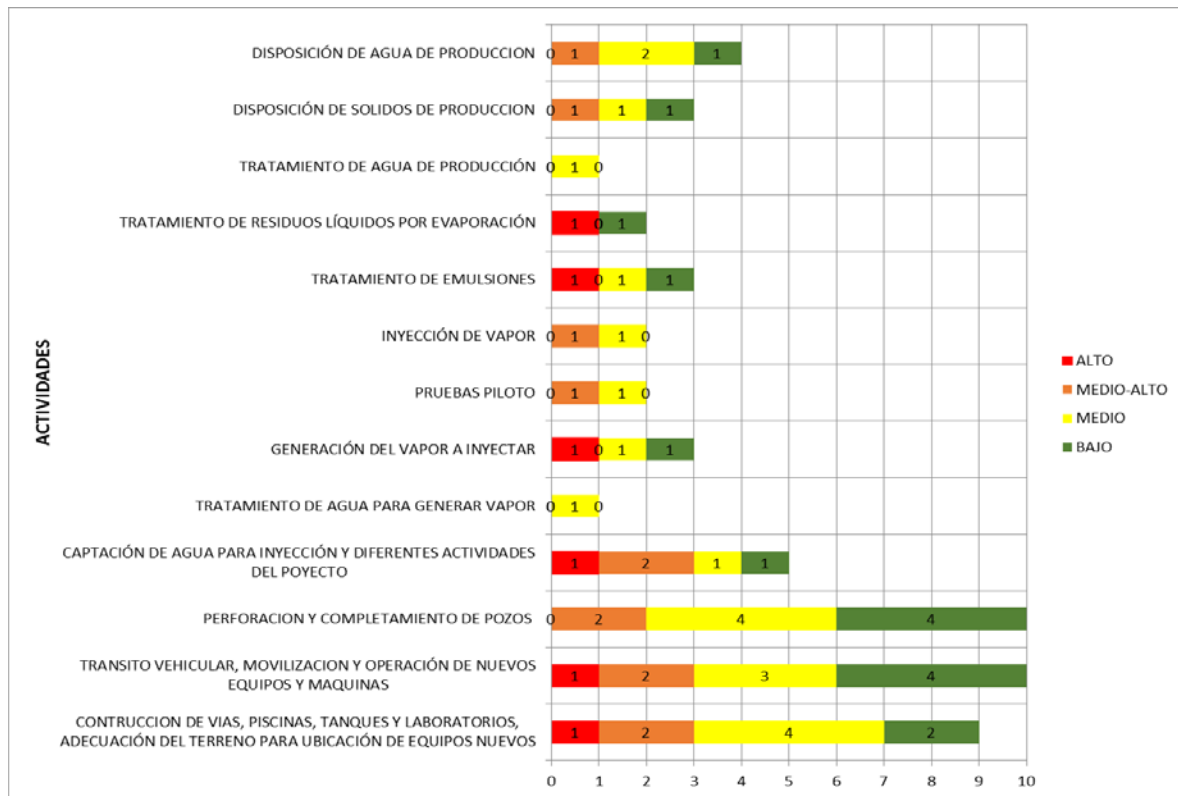
Tabla 22. Matriz de calificación de impactos ambientales - Inyección cíclica de vapor

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Incremento en la susceptibilidad a la erosión	0.3	1	1	2	1.2
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	0.3	1	1	2	1.2
Contaminación del suelo	0.3	1	2	3	1.8
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	2	3	6
Cambio en el uso actual del suelo	1	2	2	3	6
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	1	3	2	3	8
Contaminación del agua superficial	0.7	2	2	3	4.9
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.3	1	2	1	1.2
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	2	2	3	4.9
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	2	1.5
Contaminación atmosférica (emisiones)	1	3	2	3	8
Aumento en los niveles de intensidad sonora	1	1	1	3	5
Incremento en la radiación térmica y luminosa	0.7	1	1	3	3.5
Modificación de hábitats de fauna silvestre	1	2	2	3	7
Ahuyentamiento de individuos de	1	2	2	3	7

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
la fauna silvestre					
Modificación del paisaje	1	1	2	3	6
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 5. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – inyección cíclica de vapor



**4.2.5.1 Análisis ambiental – Inyección cíclica de vapor.** Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

Para generar las cantidades requeridas de vapor es necesaria una gran cantidad de agua, por lo tanto, la presión sobre el recurso hídrico es alta, así como su índice de impacto ambiental (I.I.A), a su vez la generación de vapor a inyectar generará menor cantidad de gases contaminantes respecto a la generación de vapor a inyectar para la inyección continua de vapor, pero en concentraciones considerables.

El uso del suelo variará dependiendo de la cantidad y tamaño de los equipos a utilizar en superficie, ya sean facilidades, bombas para transporte e inyección de vapor, vías, laboratorios o equipos nuevos. A su vez la cantidad de pozos a perforar puede disminuir ya que durante el proceso se utiliza el mismo pozo inyector para producir.

**4.2.6 SAGD (Drenaje Gravitacional Asistida por Vapor).** La siguiente es la matriz correspondiente a la evaluación de impactos ambientales generados por cada actividad propia del método de recobro SAGD.

Tabla 23. Matriz de evaluación de impactos ambientales – SAGD (drenaje gravitacional asistido por vapor)

IMPACTOS	Activación o agravamiento de la inestabilidad del suelo	Incremento en la susceptibilidad a la erosión	Contaminación del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Cambio en el uso actual del suelo	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Contaminación del agua superficial	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Contaminación atmosférica (emisiones)	Aumento de niveles de intensidad sonora	Incremento de radiación térmica y luminosa	Modificación de hábitats de fauna silvestre	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación del paisaje	Deterioro de la malla vial
ACTIVIDADES																	
Construcción			X	X	X						X	X	X	X	X	X	

IMPACTOS	ACTIVIDADES																	
		Deterioro de la malla vial	Modificación del paisaje	Ahuymientamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación de habbitas de fauna silvestre	Incremento de radicación térmica y luminosa	Aumento de niveles de intensidad sonora	Contaminación atmosférica (emisiones)	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Contaminación del agua superficial	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Cambio en el uso actual del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Contaminación del suelo	Activación o agravamiento de la inestabilidad del	Incremento en la susceptibilidad a la erosión
	de vías, piscinas, tanques y laboratorios, adecuación del terreno para ubicación de nuevos equipos																	
	Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos equipos y maquinas	X	X	X	X													
	Perforación y completamiento de pozos	X		X	X													
	Captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto						X	X										
	Tratamiento de agua para generar vapor								X									
	Generación de vapor a inyectar		X						X	X								
	Pruebas piloto		X						X									
	Inyección de vapor								X									
	Generación de																	

IMPACTOS	ACTIVIDADES	Deterioro de la malla vial	Modificación del paisaje	Anuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	Modificación de habbitas de fauna silvestre	Incremento de radicación térmica y luminosa	Aumento de niveles de intensidad sonora	Contaminación atmosférica (emisiones)	Afectación de cuerpos de agua subterránea	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	Contaminación del agua superficial	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	Cambio en el uso actual del suelo	Pérdida de capa orgánica del suelo	Contaminación del suelo	Activación o agravamiento de la inestabilidad del	Incremento en la susceptibilidad a la erosión	
		residuos sólidos y líquidos	Tratamiento de emulsiones					X	X	X									
Tratamiento de agua de producción	Tratamiento de residuos líquidos por evaporación						X												
Disposición de sólidos de producción	Disposición de líquidos de producción											X					X		
											X	X	X	X					

Luego de identificar y evaluar los impactos que se desarrollan por cada actividad del proyecto se debe dar una calificación a cada uno para poder ordenarlos según su gravedad.

Tabla 24. Matriz de calificación de impactos ambientales - SAGD (Drenaje Gravitacional Asistida por Vapor)

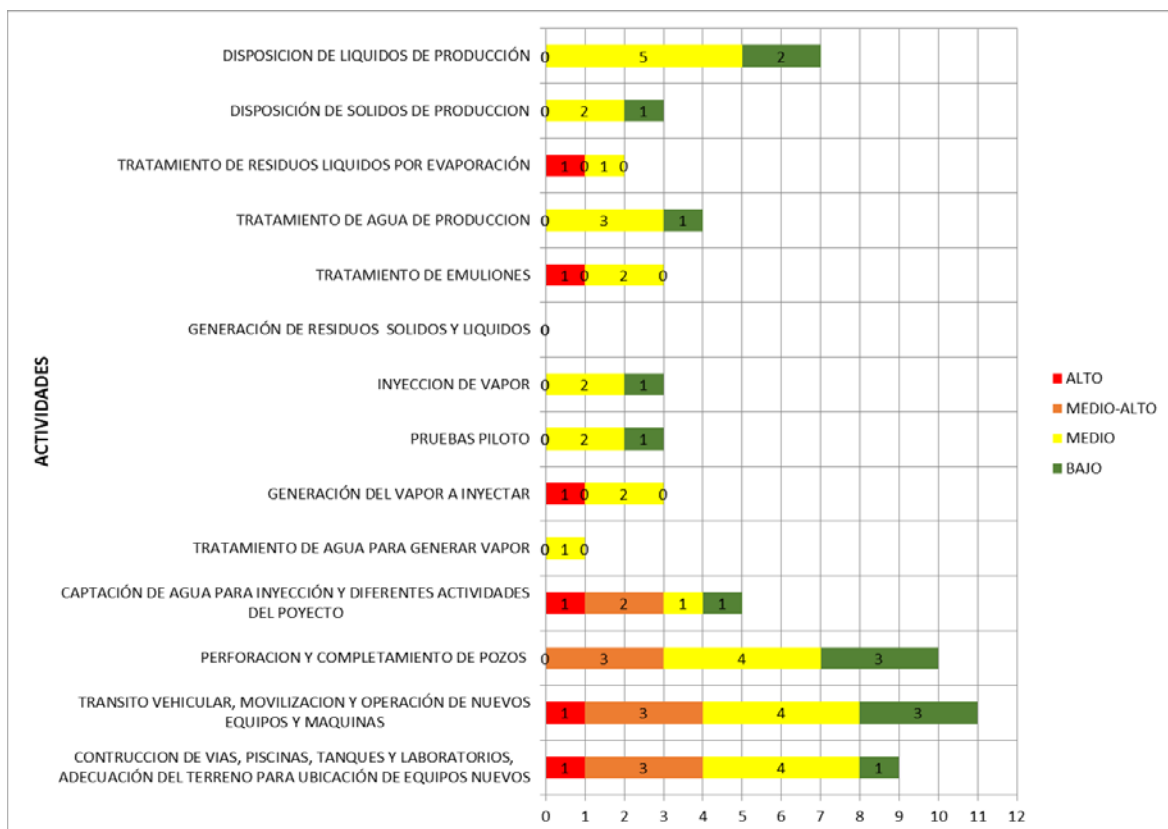
IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Incremento en la	0.3	1	1	2	1.2

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
susceptibilidad a la erosión					
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno	0.3	1	1	2	1.2
Contaminación del suelo	0.3	1	2	3	1.8
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	2	3	6
Cambio en el uso actual del suelo	1	2	2	3	6
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	1	3	2	3	8
Contaminación del agua superficial	0.7	2	2	3	4.9
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.7	1	2	3	4.2
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	1	2	3	4.2
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	2	1.5
Contaminación atmosférica (emisiones)	1	3	2	3	8
Aumento en los niveles de intensidad sonora	1	1	2	3	6
Incremento en la radiación térmica y luminosa	1	1	1	3	5
Modificación de hábitats de fauna silvestre	1	2	2	3	7
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	1	2	2	3	7
Modificación del paisaje	1	1	2	3	7

IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 6. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – SAGD.



#### 4.2.6.1 Análisis ambiental – SAGD (Segregación Gravitacional Asistida por Vapor). Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

Para generar las cantidades de vapor necesarias son requeridas grandes cantidades de agua, por lo tanto, la presión sobre el recurso hídrico es alta. Requiere poco espacio para infraestructura y a su vez la perforación de pocos



IMPACTOS	ACTIVIDADES									
		tanques y laboratorios, adecuación del terreno para ubicación de quipos nuevos	Tránsito vehicular, movilización y operación de nuevos equipos y maquinas	Perforación y completamiento de pozos	Captación de agua para inyección y diferentes actividades del proyecto	Almacenamiento de solventes	Compresión de			
Deterioro de la malla vial			X							
Modificación del paisaje			X	X						
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre			X	X		X				X
Modificación de hábitats de fauna silvestre			X	X		X				
Incremento de radiación térmica y luminosa			X	X						
Aumento de niveles de intensidad sonora			X	X						X
Contaminación atmosférica (emisiones)			X					X		
Afectación de cuerpos de agua subterránea							X			
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales							X			
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea										
Contaminación del agua superficial										
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)							X			
Cambio en el uso actual del suelo				X						
Pérdida de capa orgánica del suelo			X	X						
Contaminación del suelo			X	X						
Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno				X						
Incremento en la susceptibilidad a la erosión			X							

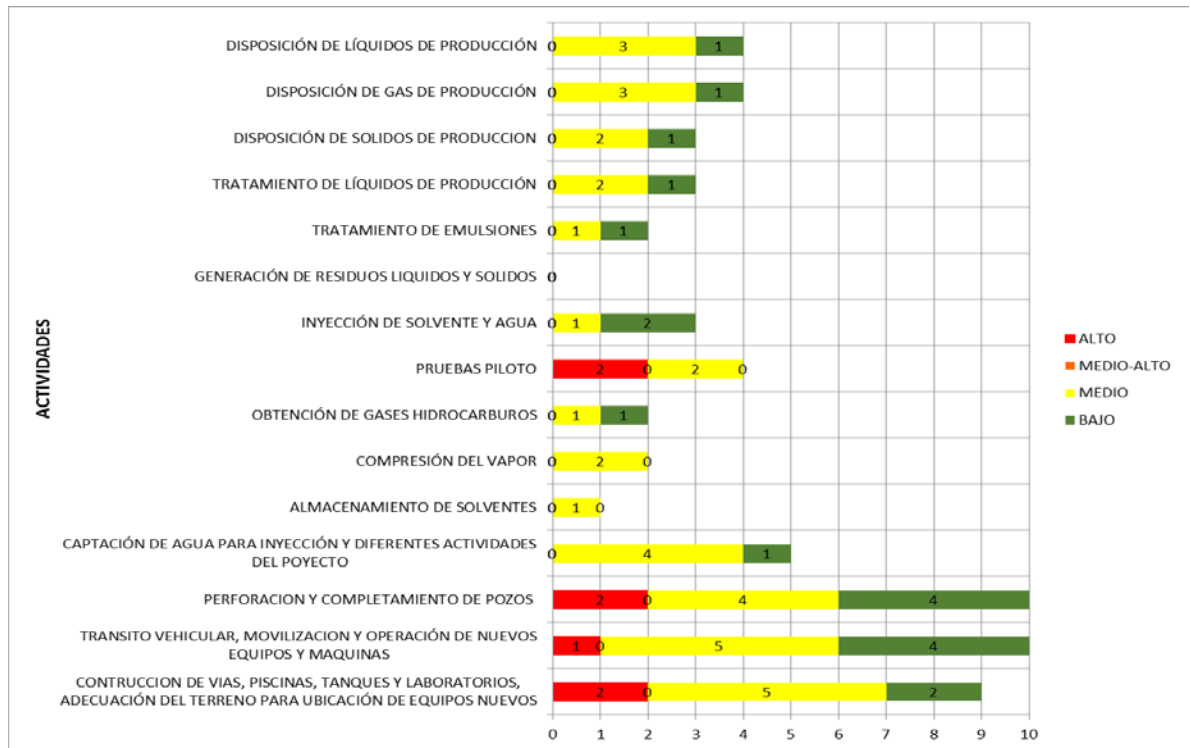
IMPACTOS	ACTIVIDADES									
		vapor	Obtención de gases hidrocarburos	Pruebas piloto	Inyección de solventes y agua	Generación de residuos líquidos y solidos	Tratamiento de emulsiones	Tratamiento de líquidos de producción	Disposición de solidos de producción	Disposición de gas de producción
	Deterioro de la malla vial									
	Modificación del paisaje									
	Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre					X				X
	Modificación de habitas de fauna silvestre					X				
	Incremento de radiación térmica y luminosa		X					X		
	Aumento de niveles de intensidad sonora				X					
	Contaminación atmosférica (emisiones)		X				X			X
	Afectación de cuerpos de agua subterránea									
	Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua superficiales									
	Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea									
	Contaminación del agua superficial									X
	Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)									
	Cambio en el uso actual del suelo			X						
	Pérdida de capa orgánica del suelo			X						
	Contaminación del suelo				X			X		
	Activación o agravamiento de la inestabilidad del terreno			X						
	Incremento en la susceptibilidad a la erosión									



IMPACTOS	PROBABILIDAD	COBERTURA	GRADO DE RECUPERACION	DURACION	INDICE DE IMPORTANCIA AMBIENTAL (I.I.A)
Contaminación del suelo	0.3	1	2	3	1.8
Perdida de la capa orgánica del suelo	1	1	4	3	8
Cambio en el uso actual del suelo	1	1	4	3	8
Presión sobre el recurso hídrico (disponibilidad)	0.7	2	2	3	4.9
Contaminación del agua superficial	0.7	2	2	3	4.9
Cambio en las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea	0.7	1	2	3	4.2
Cambios en la dinámica fluvial de los cuerpos de agua	0.7	1	2	3	4.2
Afectación de cuerpos de agua subterránea	0.3	1	2	2	1.5
Contaminación atmosférica (emisiones)	0.7	1	2	3	4.2
Aumento en los niveles de intensidad sonora	0.7	1	2	3	4.2
Incremento en la radiación térmica y luminosa	0.3	1	1	3	1.5
Modificación de hábitats de fauna silvestre	1	1	2	3	6
Ahuyentamiento de individuos de la fauna silvestre	1	1	2	3	6
Modificación del paisaje	1	1	2	3	6
Deterioro de la malla vial	0.3	2	2	3	2.1

Para que el lector pueda apreciar los resultados de manera más fácil se presenta una imagen con un resumen de la evaluación.

Gráfica 7. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales – VAPEX.



**4.2.7.1 Análisis ambiental – VAPEX.** Según los resultados obtenidos anteriormente se puede concluir que:

Se ve reflejado un alto impacto en el uso del suelo, ya que se requiere la construcción de grandes infraestructuras, no necesita grandes demandas de agua puesto que se requiere de solventes para llevar a cabo dicho proceso.

La emisión de gases tiene un impacto medio, pero a pesar de esto se debe tener cuidado con los gases que se producen ya que pueden ser gases inertes, gases ricos e incluso H<sub>2</sub>S dependiendo de las características del yacimiento.

### 4.3 RESULTADOS GENERALES DEL ANÁLISIS AMBIENTAL PARA LOS MÉTODOS DE RECOBRO

Para tener una mayor idea sobre que método es el que genera mayores impactos ambientales, basado en los análisis individuales, se realiza una agrupación general, la cual permite observar la cantidad de impactos en un rango de ALTO, MEDIO – ALTO, MEDIO y BAJO.

Gráfica 8. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales para todos los métodos

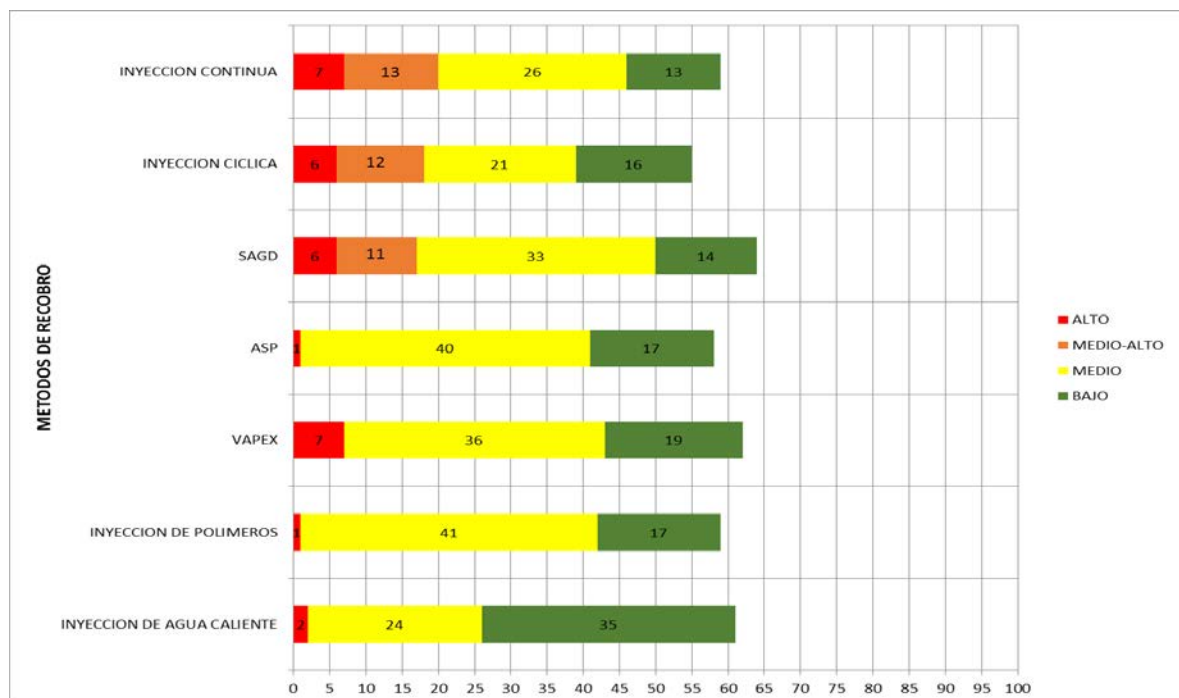


Tabla 27. Resumen de resultados de la evaluación de impactos ambientales para todos los métodos.

MET. DE RECOBRO	ALTO	MEDIO-ALTO	MEDIO	BAJO	TOTAL
INYECCIÓN DE AGUA CALIENTE	2	0	24	35	61
INYECCIÓN DE POLIMEROS	1	0	41	17	59
VAPEX	7	0	36	19	62
ASP	1	0	40	17	58
SAGD	6	11	33	14	64
INYECCIÓN CICLICA	6	12	21	16	55
INYECCIÓN CONTINUA	7	13	26	13	59

**4.3.1 Conclusiones del análisis general de los métodos de recobro.** Según los resultados mostrados en la gráfica y en la tabla donde se agrupan todos los métodos de recobro se puede concluir que:

El método de recobro que genera la mayor cantidad de impactos ambientales negativos según las actividades evaluadas es el SAGD (Drenaje Gravitacional Asistido por Vapor). A pesar de tener un número de impactos con índice de importancia ambiental alto y alto – medio muy similares a la inyección cíclica y continua de vapor se ve que sus impactos medios son más mayores y el resultado final sobrepasa la sumatoria de los otros dos métodos mencionados.

En los métodos de inyección de agua caliente, inyección de polímeros, inyección de ASP, inyección continua de vapor, inyección cíclica de vapor y SAGD (Drenaje Gravitacional Asistido por Vapor) se atribuye los impactos con alto índice de importancia ambiental a la elevada necesidad de agua durante el proyecto, mientras que los impactos con alto índice de importancia ambiental del método VAPEX se atribuye a la alta necesidad de uso del suelo por su infraestructura.

Los residuos que provienen de la aplicación de los métodos de inyección de polímeros e inyección de ASP deben ser tratados de manera especial ya que pueden contener trazas de dichos compuestos que podrían aumentar el riesgo de contaminación en el proceso de disposición de los mismos.

El método más amigable en la interacción con el medio ambiente es la inyección de agua caliente ya que la mayoría de sus impactos son calificados como bajos (53%).

Aunque todos los métodos generan un impacto importante referente al ahuyentamiento de fauna silvestre, modificación de hábitat y modificación del paisaje, existen métodos que hacen que el índice de importancia ambiental de estos impactos se encuentre en el rango MEDIO-ALTO, como por ejemplo

aquellos que necesitan la generación de vapor, haciendo que estos métodos necesiten de mayor observación, cuidado, y estudio al momento de elegir las zonas donde se desarrollarán.

## 5. SELECCIÓN DEL METODO DE RECOBRO MÁS APROPIADO AMBIENTALMENTE

Con base a las conclusiones que se obtuvieron del análisis de impactos ambientales de cada método de recobro, se definieron los parámetros que permiten la selección del método más apropiado dependiendo de las condiciones ambientales en las cuales se va a desarrollar el proyecto o se esté desarrollando; la herramienta de selección consiste en un diagrama de flujo. Los parámetros que van a permitir la selección del mejor método son las siguientes preguntas:

1. ¿Existe disponibilidad hídrica <sup>65</sup> en el lugar donde se quiere aplicar el método de recobro, para el total desarrollo de las actividades del proyecto?
2. ¿Se cuenta con un terreno adecuado (poco quebrado y con más del 50% de relieve plano) que permita la instalación de equipos y desarrollo de las actividades? ¿En el terreno donde se piensan realizar las actividades del proyecto predomina vegetación de poca importancia ecológica, tal como pastos limpios<sup>66</sup>, pastos arbolados <sup>67</sup>, pastos enmalezados o enrastrados <sup>68</sup> o cultivos transitorios<sup>69</sup>?
3. ¿Se cuenta con empresas de tratamiento de residuos líquidos y sólidos con autorización ambiental y con suficiente capacidad disponible o la zona cuenta con receptores naturales de residuos líquidos y sólidos con sobrada capacidad de asimilación?

---

<sup>65</sup> SILVA-HIDALGO, ALDAMA, MARTÍN-DOMÍNGUEZ, ALARCÓN-HERRERA. Óp. cit.

<sup>66</sup> IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. Óp. cit., p. 123.

<sup>67</sup> *Ibíd.* p.125

<sup>68</sup> *Ibíd.* p.126

<sup>69</sup> *Ibíd.* p.110

4. ¿El lugar donde se realizarían las actividades cuenta con una resiliencia<sup>70</sup> ambiental adecuada, para asimilar emisiones atmosféricas? (lugares abiertos con presencia de fuertes corrientes de viento, baja nubosidad y alta radiación solar, alejados de zonas urbanas o de hábitat de fauna silvestre)
5. ¿El área otorgada para el proyecto permite hacer adecuación del terreno para nuevas plataformas de perforación sin intervenir zonas donde predomina vegetación de alta importancia ecológica y ambiental para fauna y flora?
- **NOTA:** Cuando se realiza la pregunta 2 donde la respuesta para el método VAPEX es NO, esta se dirige hacia métodos de recobro que requieren de agua para su proceso, ya que en este caso es más eficiente por temas ambientales buscar una solución a la cantidad y transporte del agua requerida que intentar abarcar y modificar un terreno que no cumpla con las condiciones para el desarrollo del proyecto.
  - **NOTA:** Cuando se realiza la pregunta 4 donde la respuesta para el método VAPEX es NO, esta se dirige hacia métodos de recobro que requieren de agua para su proceso, ya que en este caso es más eficiente por temas ambientales buscar una solución a la cantidad y transporte del agua requerida que tratar diversos factores que en algunos casos son incontrolables como; las fuertes corrientes de viento, la baja nubosidad y la alta radiación solar en el lugar a desarrollar el proyecto.

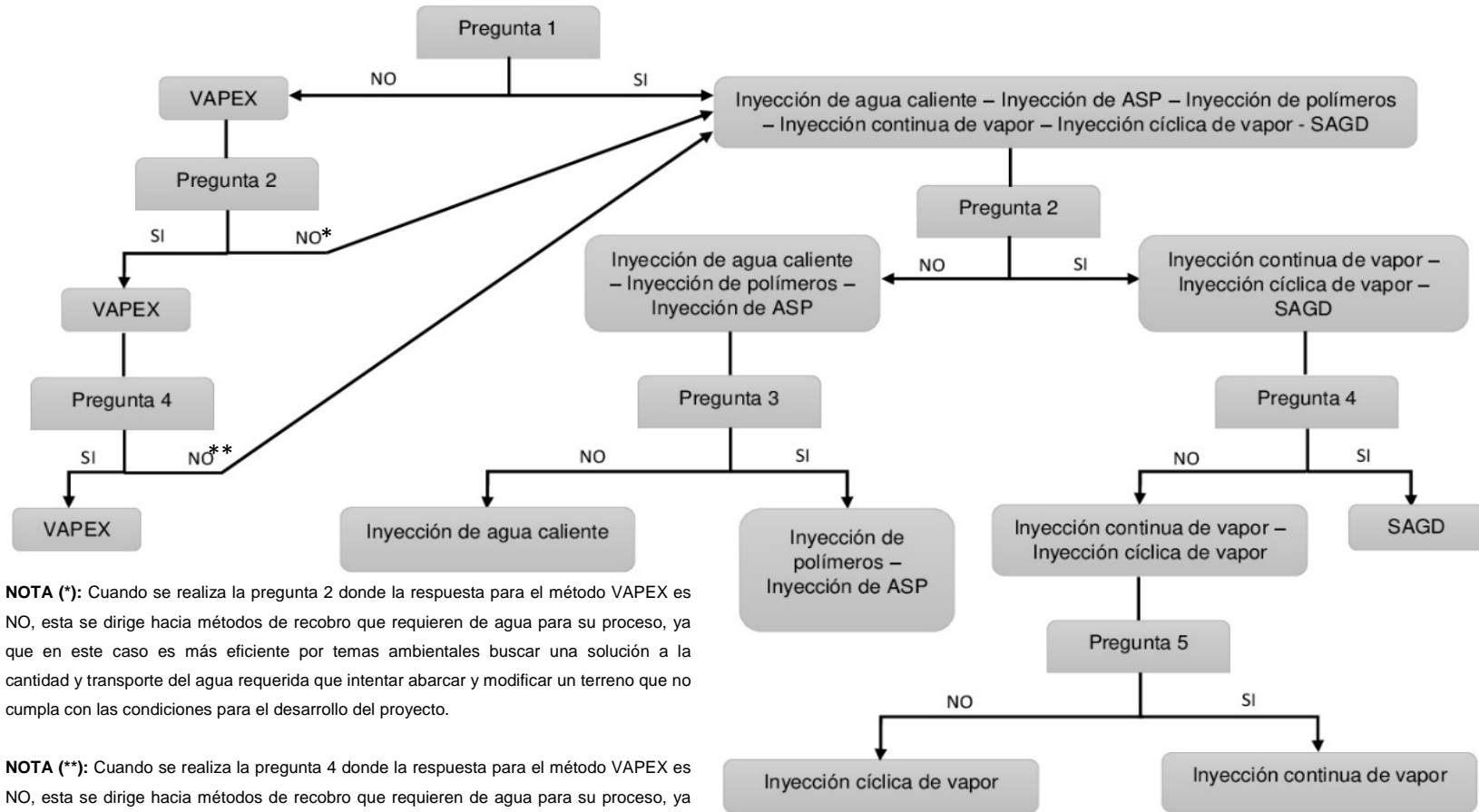
La herramienta que permitirá la mejor opción de método de recobro mejorado es un árbol de decisiones diseñado en el programa PSeInt, dicha programación se adjunta en archivo aparte.

---

<sup>70</sup> CALVENTE. Óp cit. p.2

A continuación, se muestra la selección por medio de un diagrama de árbol de decisión.

Figura 17. Esquema del árbol de decisiones



**NOTA (\*)**: Cuando se realiza la pregunta 2 donde la respuesta para el método VAPEX es NO, esta se dirige hacia métodos de recobro que requieren de agua para su proceso, ya que en este caso es más eficiente por temas ambientales buscar una solución a la cantidad y transporte del agua requerida que intentar abarcar y modificar un terreno que no cumpla con las condiciones para el desarrollo del proyecto.

**NOTA (\*\*)**: Cuando se realiza la pregunta 4 donde la respuesta para el método VAPEX es NO, esta se dirige hacia métodos de recobro que requieren de agua para su proceso, ya que en este caso es más eficiente por temas ambientales buscar una solución a la cantidad y transporte del agua requerida que tratar diversos factores que en algunos casos son incontrolables como; las fuertes corrientes de viento, la baja nubosidad y la alta radiación solar en el lugar a desarrollar el proyecto.

## 6. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones están basadas en el desarrollo que se dio a cada uno de los objetivos específicos y los resultados que cada uno arroja.

1. Con base en la información recolectada durante el desarrollo de esta tesis se concluye que, la cuenca de los Llanos Orientales cuenta con mayor cantidad de campos de crudo pesado y extrapesado; y por su resiliencia atmosférica es candidata para aplicación de métodos de recobro cuyo mayor impacto sean las emisiones atmosféricas, como la inyección cíclica de gas, la inyección continua de gas, SAGD y VAPEX.
2. Al hacer el análisis técnico de cada uno de los métodos de recobro estudiados, se encontró que la mayoría de estos proyectos pueden ser precedidos por otros métodos de estimulación, por ejemplo, la inyección de polímeros, la cual muchas veces está precedida por la inyección de agua, por esto se concluye que es importante conocer la historia del campo, con el fin de escoger un método de recobro que sea compatible con la condición actual del yacimiento y las actividades antes realizadas.
3. Después de analizar los impactos ambientales de cada uno de los métodos de recobro, se evidencio que el método más amigable con el medio ambiente es la inyección de agua caliente, ya que de los sesenta y uno (61) impactos ambientales evaluados, solo el 3% tienen un índice de impacto ambiental alto, medio-alto; mientras que los métodos de recobro que generan emisiones atmosféricas, como la inyección cíclica de vapor, la inyección continua de vapor y SAGD, son los métodos más impactantes con el ambiente, ya que el porcentaje de impactos con índice ambiental alto y medio-alto para cada uno de ellos respectivamente es: 33%, 34% y 27%.

4. Durante el desarrollo del trabajo se evidenció la falta de documentos oficiales públicos, que contengan información detallada y organizada sobre los recursos naturales que posee cada una de las cuencas, lo cual limita el estudio de impactos según la condición ambiental de cada cuenca.
5. Teniendo en cuenta que los impactos ambientales de mayor relevancia en nuestro estudio son: presión sobre el recurso hídrico, uso de terreno con importancia ambiental y emisiones atmosféricas, se encontró que la mayoría de los métodos a excepción del VAPEX, generan una gran presión sobre el recurso hídrico; mientras que, la inyección cíclica de vapor, inyección continua de vapor, SAGD y VAPEX generan presión sobre el uso del suelo y fuertes emisiones de gases a la atmósfera.
6. Al desarrollar la herramienta que permite la selección del método de recobro más adecuado desde el punto de vista ambiental, se encontraron métodos que no permiten hacer una selección entre ellos, la inyección de polímeros y la inyección de ASP, ya que los impactos ambientales que ambos generan son muy similares debido al gran parecido que existe entre sus procesos; por tal razón la selección de uno de ellos depende de otros factores, por ejemplo, económicos o técnicos.

## 7. RECOMENDACIONES

Para los lectores que estén interesados en profundizar sobre el tema de estudio se sugiere:

- Integrar derivados de los métodos de recobro aquí propuestos y realizar el estudio y análisis de impactos ambientales para cada uno, con el fin de aumentar la oportunidad de recuperación de crudo pesado y extra-pesado en el país de manera ambientalmente segura.
- Aplicar la herramienta de selección del método más adecuado ambientalmente a un caso de estudio, ya sea con datos reales o supuestos a partir de la historia del campo donde se piensa aplicar el recobro mejorado y mostrar los resultados.
- Al momento de seleccionar un método de recobro adecuado, además de tener en cuenta los aspectos técnicos y económicos, se recomienda integrar la variable ambiental, teniendo en cuenta los impactos que estos generan, obteniendo de tal forma una selección más viable y completa.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUILLON DUARTE, Javier Orlando y GARCIA RIBERO, Fredy Joane. Sistema experto para la selección técnica de un método de recobro mejorado para un campo de crudo. Tesis de pregrado, en mención al título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2004.

ANH Open Round. Colombia. 2010

ANH, 2010, Disponible en: [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/EstudiosIntegradosyModelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20\(PDF\).pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/EstudiosIntegradosyModelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20(PDF).pdf)

ANH. Mapa Geológico de Colombia/ Ingeominas. [En línea]. Colombia, 2010. Disponible en: [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-IntegradosyModelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20\(PDF\).pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-IntegradosyModelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20(PDF).pdf)

ARCILA ESTRADA, María Teresa, LÓPEZ, John Fredy, MUÑOZ, Jenny y MARTÍNEZ Lucia. Magdalena Medio Desarrollo regional: una tarea común universidad-región. [En línea]. Grupo de investigación región Magdalena Medio. Medellín: Universidad de Antioquia, 2003. Disponible en: <http://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/7a67a97c-190f-4760-ab68e493f2fbddb4/caracterizacion-magdalena-medio.pdf?MOD=AJPERES>

CABALLERO ACOSTA, Humberto, DURANGO LÓPEZ, Consuelo y GIRALDO CASTRO, Carlos Augusto. Los humedales del magdalena medio antioqueño desde una perspectiva física y sociocultural. [En línea]. 2001. Disponible en:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/53695/1/Gest.%20y%20Amb.%20Vol.%204%20No.%202-67.pdf>

CABARCAS, Manuel. Clasificación del petróleo. Archivo llamado: jitorres\_T1.1-Composicion del Crudo. 2015 □ p.3 □ Recuperado el 15 de noviembre de 2015 □

CALVENTE, Arturo. Resiliencia: un concepto clave para la sustentabilidad. [En línea]. Universidad Abierta Interamericana. UAIS-CS-200-003, 2007. p.2. Disponible en: <http://capacitacionpedagogica.uai.edu.ar/pdf/cs/UAIS-CS-200-003%20%20Resiliencia.pdf>

CORREA, Hernán Darío, RUIZ, Sandra Lucía y ARÉVALO, Luz Marina. Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 – 2015. [En línea]. Propuesta Técnica. Bogotá D.C.: Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ – Colombia, 2005. 273 p. Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/world/co/co-nbsap-oth-es.pdf>

DALTÓNICO. Cordillera Oriental de Colombia. [En línea]. Atlas Geográfico. Colombia. 2013. Disponible en: <https://atlasgeografico.net/cordillera-oriental-de-colombia.html>

FINKEROS. La región del Magdalena Medio. [En línea]. 2013. Disponible en: <http://abc.finkeros.com/la-region-delmagdalena-medio/> [Recuperado el 30 de octubre de 2013].

FLORES BARROSO, Aarón Armando y MARÍN RANGEL, Cesar Emmanuel. Tesis de grado, en mención de Ingeniero de petróleos. VAPEX inyección de solventes y potencial aplicación en yacimientos de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2017. p. 15

Fundación Universitaria del Área Andina. 2016

GAVIRIA, Álvaro. Parques Nacionales Naturales de Colombia.

GOMEZ, Luis. Inyección Continua de Vapor. Petróleo America.2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.petroleoamerica.com/2011/02/normal-0-21-false-false-false-es-ve-x.html>

HEAVY OILLOL, Recovery Processes – Thermal Heavy Oil. [En línea]. Canadian Heavy Oil Association. Disponible en: [www.choa.ab.ca](http://www.choa.ab.ca)

HERRERA, María Teres. Metodología para la determinación de disponibilidad y déficit de agua superficial en cuencas hidrológicas: aplicación al caso de la normativa mexicana. [En línea]. Artículo técnico. México: Universidad Autónoma de Chihuahua, 2012. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000100002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000100002)

IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. [En línea]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 2008. p.107 - 132. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021521/LIBROCORINEFINAL.pdf>.

IDEAM. Participación ciudadana: Hidrología. [En línea]. Colombia: MinAmbiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/hidrologia>

KIRCHER, Friedrich. Cordillera Oriental. 2008.

LA COMUNIDAD PETROLERA. Cuenca Sedimentaria. [En línea]. Disponible en: <https://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/1234-cuenca-sedimentaria>  
LITTLE, Arthur. Presentación: Tendencias y Desafíos en el Mercado de Crudos Pesados. Bogotá, 2015 (4th Heavy Oil Work Group).

LOPEZ, Adelaida, CORTES, Alberto y CUELLAR, Durley. Cuencas sedimentarias de Colombia. [En línea]. Colombia: INSTITUTO CET PETROL, 2012. p.15 - 17. Disponible en: <https://es.slideshare.net/macorca123/cuencas-sedimentarias-de-colombiadoc-1>

MARTINS, 2001, [En línea]. Disponible en: [http://producciondecruoextrapesado.blogspot.com.co/p/blog-page\\_23.html](http://producciondecruoextrapesado.blogspot.com.co/p/blog-page_23.html)

MOJICA, Jairo, Subdirección Técnica ANH, Cuencas Catatumbo, Cesar-Ranchería, Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Valle Medio y Superior del Magdalena, 2009.

MONTER GARCÍA, Francisco. Segregación gravitacional asistida por vapor, proceso SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage). Tesis de grado, en mención Ingeniero de petroleos. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2010. p 13

OIL SANDS MAGAZINE. [En línea] 2016, Disponible en: <http://www.oilsandsmagazine.com/news/2016/2/15/why-venezuela-is-albertas-biggest-competitor>

OTAVO RODRÍGUEZ, Edgar. Mocoa. [En línea]. Mocoa. 2008. [Publicado en abril de 2008]. Disponible en: <http://www.corpoamazonia.gov.co/images/Publicaciones/>

24%202008\_ESTADO\_RECursos\_NATURALES/2008\_estado\_recursos\_naturales.pdf

PAEZ, LOPEZ, GOMEZ, ASP como método de recobro mejorado. 2017.

Panorámico. [En línea] 2011. Disponible en: <http://www.panoramio.com/photo/54961952>

PARIS DE FERRER. La comunidad petrolera. Magdalena, 2009

PDVSA-CIED, 1998

PEÑUELA RECIO, Lourdes, CASTRO, Francisco y OCAMPO PEÑUELA, Natalia. Las Reservas Naturales del Nodo Orinoquia en su rol de conservación de la biodiversidad. [En línea]. Colombia: Fundación Horizonte Verde y Resnatur, 2011. p.24 (104). Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/8284/1/RESERVAS-NATURALES-ORINOQUIA.pdf>

RAMÍREZ LÓPEZ, John. Biodiversidad del Tolima: entre parques naturales y ecosistemas estratégicos. [En línea]. Periódico el nuevo día. 2018. Disponible en: <http://www.elnuevodia.com.co/nuevodia/especiales/dia-del-tolima/253653-biodiversidad-del-tolima-entre-parques-naturales-y-ecosistemas-estr> [Publicado el 26 de febrero del 2018]

RAMSEY, Mark. Inundación con agua caliente. Oilfield glossary. [En línea]. Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/maincredits.aspx>

RAMSEY, Mark. Inyección cíclica con vapor. Oilfield glossary. [En línea]. Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/maincredits.aspx>

RANGEL RENDON, Diego Alencer, HERREÑO, Andrés Rossi, CELY, Juan Camilo. Inyección ASP. Métodos de Recobro. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013

RIEDEL, Stephan. Valle medio del Magdalena, cerca de Barrancabermeja. [En línea] Banco de Occidente, Disponible en: <https://imeditores.com/banocc/rio/fotos.php?id=66>

RODRIGUEZ MORENO, Luz Dary, TORRES VEGA, Jhon Edinson y BERMUDEZ POMAREZ Jesús. Polímeros. Polymer Flooding: Inyección de Polímeros. 2017

SILES ARIAS, Yordan Michael. Tipos de Petróleo Crudo Según Grado API. [En línea]. p. 2. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/313841475/Tipos-de-Petroleo-Crudo-Segun-Grado-API>

SILVA HIDALGO, Humberto, ALDAMA, Álvaro, DOMÍNGUEZ, Ignacio, ALARCÓN-SINAP. Parques Nacionales Naturales de Colombia. Bogotá D.C, 2002 - 2009

TARDIOLÍ, Myriam. Cordillera Oriental de Colombia: Características, Relieve, Flora, Fauna, Hidrografía. [En línea]. Colombia. Disponible en: <https://www.lifeder.com/cordillera-oriental-colombia/> El Bosque Alto Andino y El Páramo, Flora del Páramo

THE FREE DICTIONARY. Definición de Quebrado. [En línea]. Disponible en: <https://es.thefreedictionary.com/quebrado>

VAPEX inyección de solventes y potencial aplicación en yacimientos de México. México. 2017

VARGAS JIMÉNEZ, Carlos Alberto. Nuevos aportes a la estimación del potencial de hidrocarburos en Colombia, 2009. p.17 (33). ISSN 0370-3908. Disponible [En línea]: <https://es.scribd.com/document/90881982/Nuevos-Aportes-Al-Conocimiento-Sobre-Potencial-Hidrocarburiifero-de-Colombia-1>