

**ENERGÍA GEOTÉRMICA Y LA EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS HIDROCARBUROS:
OPORTUNIDADES PARA UNA MUTUA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

JHON DAVID GIRALDO RODRIGUEZ

LUIS CARLOS VESGA LEÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2015

**ENERGÍA GEOTÉRMICA Y LA EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS HIDROCARBUROS:
OPORTUNIDADES PARA UNA MUTUA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

JHON DAVID GIRALDO RODRIGUEZ

LUIS CARLOS VESGA LEÓN

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero de petróleos**

Directora

ZULY H. CALDERON CARRILLO

Dra. Ingeniera de petróleos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTA DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

*DIOS. RECUERDAME SIEMPRE QUE TUS PLANES
SON MAS GRANDES QUE LOS MIOS.*

*A MI HIJO: RAFAEL VESGA HUERTAS
QUIEN ES MI MOTOR DIA A DIA Y QUIEN
Ha SACRIFICADO EL TIEMPO COMPARTIDO*

*A MIS PADRES: LUIS MARTIN VESGA NOSSA
ANA LUISA LEÓN DE VESGA
POR SU APOYO INCONDICIONAL Y
CONSTANTE EN ESTE CICLO*

*A MIS HERMANOS Y SOBRINA: MARTÍN HUMBERTO VESGA LEÓN
FEISAL GABRIEL VESGA LEÓN (qepd)
DAYANA KAMILA VESGA PARRA.
POR QUERER VER MIS RESULTADOS PROFECIONALES*

*AL PLANETA
POR QUE SE QUE NECESITA DE NUESTRA AYUDA*

*ESTA MONOGRAFIA SE REALIZÓ BAJO LA DIRECCION DE LA
DRA. ZULY CALDERON CARRILLO
A QUIEN AGRADEZCO SU PACIENCIA, OBSERBACIONES Y ATERRIZAJE DE LA PROPUESTA*

LUIS CARLOS VESGA LEÓN

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

*A DIOS POR SER MI SUSTENTO ESPIRITUAL
QUIEN ME FORTALECE DIA A DIA PARA TRANSITAR
EL PROVECHOSO CAMINO DEL ESFUERZO Y LA RECTITUD.*

*A MIS PADRES: CLEOTILDE RODRIGUEZ CUIÑO Y
DAGOBERTO GIRALDO SALAZAR
POR SER MI MOTIVACION DE SUPERACION PERSONAL
Y SOPORTE ECONOMICO INCONDICIONAL,
POR CREER SIEMPRE EN MÍ SIN
IMPORTAR LAS DECISIONES QUE TOME.*

*A HELENA PATRICIA PATARROLLO
POR SU INCONDICIONAL AMISTAD Y APOYO
DURANTE TODO ESTE PROCESO DE PROYECTO DE VIDA
LLAMADO UNIVERSIDAD.*

*ESTA MONOGRAFIA SE REALIZÓ BAJO LA DIRECCION DE LA
DRA. ZULY CALDERON CARRILLO
A QUIEN AGRADEZCO IGUALMENTE SU PACIENCIA, OBSERVACIONES Y ATERRIZAJE DE LA
PROPUESTA*

JHON DAVID GIRALDO RODRIGUEZ

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. PANORAMA ACTUAL DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA	18
1.1. DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	20
1.1.1. Proyecto macizo volcánico del Ruíz.	24
1.1.2. Proyecto binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro.	26
1.1.3. Proyecto geotérmico de Azufral.	28
1.1.4. Proyecto geotérmico de Paipa.	30
1.2. MARCO NORMATIVO Y AMBIENTAL DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA	31
1.2.1. Esquema institucional.	33
1.2.2. Normatividad aplicable al desarrollo y explotación de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia.	36
2. DIFICULTADES COMPARTIDAS DE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA Y DE LOS HIDROCARBUROS EN COLOMBIA.....	46
2.1. PERFORACIÓN Y COMPLETAMIENTO.....	46
2.2. FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES.	51
2.3. CORROSIÓN.	54
2.4. PROBLEMAS GEOMECÁNICOS.....	56
2.5. IMPACTOS AMBIENTALES Y LICENCIAMIENTO AMBIENTAL.....	58
2.5.1. Emisiones de gases efecto invernadero.	59
2.5.2. Vertimiento de residuos geotérmicos y petroleros producidos y su influencia en el agua potable y suelos.....	61
2.5.3. Competencia por el agua para consumo humano y/o alimentario.....	61
2.5.4. Impactos de la exploración sísmica con explosivos.	61
2.5.5. Demora en el licenciamiento ambiental.	63
2.6. ADMINISTRACIÓN DEL RECURSO Y EFICIENCIA DE LOS PROCESOS. ..	66
2.6.1. Aguas asociadas a la producción de petróleo.....	67
2.6.2. Crudos pesados.	67
2.6.3. Transporte asociado al consumo de hidrocarburos y eficiencia global de los procesos.	68
3. TECNOLOGÍA Y LEGISLACIÓN ACTUAL CON POTENCIAL DE IMPLEMENTARSE PARA LOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS.....	71
3.1. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA.	71
3.2. ENERGÍA GEOTÉRMICA A PARTIR DE POZOS PETROLEROS ABANDONADOS.	75

3.3.	ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE ESFUERZOS BASADO SOBRE MECANISMOS FOCALES E IMÁGENES DE RETROPROYECCIÓN EN COLOMBIA.	79
3.4.	CORRELACIÓN ENTRE LA MICROSISMICIDAD Y LA DINÁMICA DEL YACIMIENTO EN UN ÁREA TECTÓNICAMENTE ACTIVA DE COLOMBIA.	81
3.5.	MODELO 3D HIDROGEOLOGICO Y GEOMECAÁNICO PARA EL MEJORAMIENTO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO EN THE GEYSER EN CALIFORNIA.	83
3.6.	OPTIMIZACIÓN DE UBICACIÓN DE POZOS Y EL CONTROL PARA UNA PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA BAJO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA.	84
3.7.	TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN CIRCULACIÓN EN REVERSA DE GAS-LIFT.	85
3.8.	PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO GEOTÉRMICO Y PETROLERO.	87
3.9.	CAPTACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN FINAL DE CO ₂	91
3.10.	REINYECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO EN FORMACIONES DE INTERÉS ECONÓMICO.	97
3.11.	EXPLORACIÓN GEOFÍSICA SATELITAL.	98
3.12.	IMPORTACIÓN DE LEYES EN ENERGÍAS RENOVABLES, LICENCIAMIENTO AMBIENTAL Y SEGUIMIENTO A LOS PROYECTOS.	99
3.13.	EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS.....	107
3.13.1.	Recobro mejorado de petróleo basado en el aprovechamiento de yacimientos de energía geotérmica con la utilización de pozos abandonados de la industria de hidrocarburos en Colombia.	107
3.13.2.	Hidrógeno la energía del futuro.....	110
3.13.3.	Eficiencia energética.....	117
4.	OPORTUNIDADES PARA IMPLEMENTAR TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA ENTRE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA Y DE LOS HIDROCARBUROS EN COLOMBIA A TRAVÉS DE LA MATRIZ DOFA	118
4.1.	APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS.	119
4.2.	ANÁLISIS DOFA PARA LA SÍSMICA PASIVA USADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS PETROLEROS EN COLOMBIA: CASO PUERTO GAITÁN, CUSIANA Y CUPIAGUA.	123
4.3.	ANÁLISIS DOFA PARA UN MODELO 3D HIDROGEOLOGICO Y GEOMECAÁNICO PARA EL MEJORAMIENTO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO EN THE GEYSER EN CALIFORNIA USA.....	125
4.4.	ANÁLISIS DOFA PARA UNA OPTIMIZACIÓN DE UBICACIÓN DE POZOS Y EL CONTROL PARA UNA PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA BAJO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA.	127
4.5.	ANÁLISIS DOFA PARA LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A PARTIR DE POZOS PETROLEROS ABANDONADOS.	129

4.6.	TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN DE CIRCULACIÓN EN REVERSA GAS-LIFT.	131
4.7.	PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO GEOTÉRMICO.....	133
4.8.	ANÁLISIS DOFA PARA LA CAPTACIÓN, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE CO ₂ EN FORMACIONES GEOLÓGICAS EN COLOMBIA.	135
4.9.	ANÁLISIS DOFA PARA LA INYECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO EN FORMACIONES DE INTERÉS ECONÓMICO.	139
4.10.	ANÁLISIS DOFA PARA LA EXPLORACIÓN GEOFÍSICA SATELITAL	141
4.11.	ANÁLISIS DOFA PARA LA IMPORTACIÓN DE LEYES EN ENERGÍAS RENOVABLES, LICENCIAMIENTO AMBIENTAL Y SEGUIMIENTO A LOS PROCESOS.....	143
4.12.	ANÁLISIS DOFA PARA IMPLEMENTAR EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	145
4.13.	ANÁLISIS DOFA PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	147
5.	DESCRIPCIÓN DE LAS OPORTUNIDADES PARA IMPLEMENTAR TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA ENTRE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA Y DE LOS HIDROCARBUROS EN COLOMBIA.....	149
6.	CONCLUSIONES.....	156
7.	RECOMENDACIONES.....	157
	BIBLIOGRAFIA	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal de los Andes Colombianos.	19
Figura 2. Manifestaciones geotérmicas en Colombia.	20
Figura 3. Zonas potencialmente geotérmicas en Colombia.	24
Figura 4. Corazones recuperados Nevado del Ruíz.	25
Figura 5. Área de acuerdo binacional Tufiño-Chiles.	26
Figura 6. Emisiones de CO ₂ por fuente de energía primaria en EEUU.	60
Figura 7. Ciclo Rankine Orgánico.	73
Figura 8. Diagrama T vs S entalpia ciclo Rankine.	74
<i>Figura 9. Esquema del Intercambiador de calor en fondo de pozo.</i>	<i>77</i>
Figura 10. Diferentes sistemas de captación de CO ₂ disponibles.	94
Figura 11. Flujo de proceso en la recuperación de CO ₂ y H ₂ S con aminas.	96
Figura 12. Diagrama de los posibles sistemas de almacenamiento de CO ₂	96
Figura 13. Efecto de la saturación de los fluidos del yacimiento de crudo y gas para la recuperación de energía geotermal.	109
Figura 14. Abandono técnico de pozos de producción de Ecopetrol por operación directa y socios.	110
Figura 15. Incremento de la temperatura media terrestre con extrapolación a 2050.	111
Figura 16. Esquema de una célula de combustible de hidrógeno.	114
Figura 17. Participantes de los procesos de transferencia de tecnología.	118

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Volcanes de Colombia.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2. Evaluación del potencial geotérmico volcán Tufiño (ecuador).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3. Tipos de corrosión en campos petroleros y geotérmicos.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 4. Impactos Ambientales de prospección sísmica</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5. Ventajas y desventajas de las tecnologías más comunes para el tratamiento de los TDS.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 6. Ventajas y desventajas de las tecnologías más comunes para el tratamiento de los NCGs.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 7. Línea de tiempo de las leyes de las energías renovables.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 8. Impactos ambientales del desarrollo humano.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 9. Propiedades del hidrógeno.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 10. Producción de hidrógeno por fuente.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 11. Comparación entre combustibles: hidrógeno, gasolina y metano.</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 12. Matriz DOFA para el aprovechamiento de aguas de producción de campos petroleros.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 13. Matriz estratégica para el aprovechamiento de aguas de producción de campos petroleros.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 14. Matriz DOFA para la sísmica pasiva usada en la caracterización de yacimientos petroleros en Colombia: caso Puerto Gaitán, Cusiana y Cupiagua.</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 15. Matriz estratégica para la sísmica pasiva usada en la caracterización de yacimientos petroleros en Colombia: caso Puerto Gaitán, Cusiana y Cupiagua.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 16. Matriz DOFA para un modelo 3D hidrogeológico y geomecánico para el mejoramiento de un sistema geotérmico en the Geysers en California USA.</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 17. Matriz estratégica para un modelo 3D hidrogeológico y geomecánico para el mejoramiento de un sistema geotérmico en The Geysers en California USA.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 18. Matriz DOFA para una optimización de ubicación de pozos y el control para una prospección geotérmica bajo incertidumbre geológica.</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 19. Matriz estratégica para una optimización de ubicación de pozos y el control para una prospección geotérmica bajo incertidumbre geológica.</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 20. Matriz DOFA para la energía geotérmica a partir de pozos petroleros abandonados.</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 21. Matriz de estrategias para la energía geotérmica a partir de pozos petroleros abandonados.</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 22. Matriz DOFA para la tecnología de perforación de circulación en reversa gas-lift:</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 23. Matriz estratégica para la tecnología de perforación de circulación en reversa gas-lift:</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 24. Matriz DOFA para procesos de tratamiento de los fluidos de producción en un campo geotérmico:.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 25. Matriz estratégica para procesos de tratamiento de los fluidos de producción en un campo geotérmico.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 26. Matriz DOFA para la captación, transporte y almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas en Colombia.....</i>	<i>136</i>

<i>Tabla 27. Matriz estratégica para la captación, transporte y almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas en Colombia.</i>	138
<i>Tabla 28. Matriz DOFA para la inyección y aprovechamiento de aguas de desecho en formaciones de interés económico.</i>	139
<i>Tabla 29. Matriz estratégica para la inyección y aprovechamiento de aguas de desecho en formaciones de interés económico.</i>	140
<i>Tabla 30. Matriz DOFA para la exploración geofísica satelital.</i>	141
<i>Tabla 31. Matriz estratégica para la exploración geofísica satelital.</i>	142
<i>Tabla 32. Matriz DOFA para la importación de legislación y parámetros ambientales de regulación y seguimiento.</i>	143
<i>Tabla 33. Matriz estratégica para la importación de legislación y parámetros ambientales de regulación y seguimiento.</i>	144
<i>Tabla 34. Matriz DOFA para implementar el hidrógeno como combustible.</i>	145
<i>Tabla 35. Matriz estratégica para implementar el hidrógeno como combustible.</i>	146
<i>Tabla 36. Matriz DOFA para la eficiencia energética.</i>	147
<i>Tabla 37. Matriz estratégica de la eficiencia energética.</i>	148
<i>Tabla 38. Oportunidades para desarrollar transferencia de tecnología en Colombia.</i>	150

RESUMEN

TÍTULO: ENERGÍA GEOTÉRMICA Y LA EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS HIDROCARBUROS: OPORTUNIDADES PARA UNA MUTUA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA.*

AUTORES: LUIS CARLOS VESGA LEÓN
JHON DAVID GIRALDO RODRÍGUEZ.**

Palabras claves: Energía Geotérmica, Transferencia de Tecnología, Matriz DOFA, Industria de los Hidrocarburos.

Este proyecto de grado tiene el objetivo de aprovechar los adelantos tecnológicos, financieros, sociales y políticos de la industria geotérmica y petrolera en Colombia con el fin de identificar las oportunidades para una mutua transferencia de tecnología.

En primer lugar se describe el panorama actual de la Energía geotérmica en Colombia; su desarrollo, marco normativo y ambiental que la pueden regir, exponiendo cada una de las características potenciales con las que cuenta el país para desarrollar esta industria a un corto, mediano y largo plazo.

Posteriormente se identificaron algunos problemas principales que estas dos industrias enfrentan en Colombia referente a ingeniería, marco legislativo y ambiental que puedan relacionarse mutuamente con el objetivo de recopilar información de la tecnología y legislación actual más relevante de estas industrias, que puede ser aplicada en Colombia. A través de una matriz DOFA se analizó la información recopilada con el fin de la identificación de oportunidades para la implementación de transferencia de tecnología entre la industria de los hidrocarburos y geotérmica en el país.

Finalmente se describen las oportunidades para realizar la transferencia de tecnología más conveniente para cada industria en Colombia, a partir de la evaluación de las virtudes de cada una de las propuestas y como éstas pueden dar solución a sus necesidades.

* Trabajo de Grado.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director Ph.D. Zuly Himelda Calderón Carillo.

ABSTRACT

TITLE: GEOTHERMAL ENERGY AND THE EXPLOITATION OF HYDROCARBON RESERVOIRS: OPPORTUNITIES FOR A MUTUAL TRANSFER OF TECHNOLOGY.¹

AUTHORS: LUIS CARLOS VESGA LEÓN.
JHON DAVID GIRALDO RODRÍGUEZ.**

KEYWORDS: Geothermal Energy, Technology Transfer, DOFA matrix, Hydrocarbon Industry.

This degree project aims to take advantage of technological, financial, social and political developments of geothermal and oil and gas industry in Colombia in order to identify opportunities for mutual transfer of technology.

First of all, the current outlook of geothermal energy in Colombia was described also with its development, regulatory and environmental framework that can govern it, exposing each of the potential features that the country has to develop this industry in a short, medium and long term.

Subsequently some major problems which confront these two industries in Colombia were identified relating to engineering, legal and environmental framework that can associate to each other in order to gather information from the most relevant technology and current legislation of these industries, which can be applied in Colombia. The information gathered in order to identify opportunities to implement technology transfer between geothermal and hydrocarbons industry in the country were analyzed through a SWOT matrix.

Finally, the opportunities for technology transfer more convenient for each industry in Colombia, from the assessment of the attributes of each of the proposals and how they can solve their needs were described.

¹ Degree Project.

** Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering School, Director Ph.D. Zuly Himelda Calderón Carillo.

INTRODUCCIÓN

El día a día en nuestro país y en el mundo trae consigo un consumo mayor de energía en cualquiera de sus formas, por ello es de gran importancia que a su vez la oferta de esta sea en su defecto mayor en el tiempo. Las fuentes de las cuales se pueden explotar para la obtención de este preciado recurso son variadas siendo las más importantes en sus regiones de Colombia los combustibles fósiles y las hidroeléctricas. Sin embargo los combustibles fósiles por su carácter no renovable ha hecho que la adición de reservas tenga más incertidumbre y el potencial de las hidroeléctricas enfrenta dificultades ya que los lugares de mayor potencial ya han sido aprovechados; esto hace que estos dos renglones relevantes del ámbito energético colombiano sean menos favorables en su explotación a medida que prolongamos su uso.

Por eso es de gran importancia virar el curso de nuestros esfuerzos al desarrollo de nuevas fuentes energéticas y aumentar la eficiencia de las existentes. Las cuales a mediano y largo plazo se pueden volver en actores importantes para el desarrollo de nuestro país. Para ello es de gran importancia estudiar y evaluar las potencialidades de nuestro país para aprovechar un nuevo tipo recurso que nos impulse en el futuro a ser un país independiente energéticamente.

La ubicación de nuestro país en la región andina suramericana genera grandes expectativas en la explotación de yacimientos geotérmicos que muy pocos países han explotado, pero que a su vez se proyecta como una solución a las crecientes dificultades energéticas. Para la explotación de este tipo de recurso que se encuentra en el subsuelo a condiciones críticas de temperatura y presión expone enormes retos que involucran áreas muy importantes en el sector de los hidrocarburos como lo son; la exploración, perforación, caracterización de yacimientos y su consecuente producción.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto es de gran importancia evaluar las potencialidades para aprovechar los adelantos tecnológicos, financieros, sociales y políticos de la industria geotérmica y la explotación de yacimientos hidrocarburos en Colombia con el fin de identificar las oportunidades para una mutua transferencia de tecnología.

Con este trabajo se pretende dar a conocer como la industria geotérmica y la industria de los hidrocarburos se asemejan y complementan, en este sentido la transferencia de tecnología se propone como solución a ciertas necesidades técnicas y administrativas.

El capítulo uno se enfoca en los recursos geotérmicos existentes en el país y como pueden llegar a ser explotados, mostrando el panorama actual de la geotérmica en Colombia; los proyectos actualmente en desarrollo y la normativa ambiental que la puede regir.

En el segundo capítulo se identifican los principales problemas que pueden compartir la industria de los hidrocarburos y la geotérmica en Colombia. En el tercer capítulo se proponen tecnologías, técnicas y recursos que pueden dar solución a estos problemas.

En capítulo cuarto, por medio de la herramienta de la matriz DOFA se analiza las oportunidades, fortalezas, amenazas y debilidades que las tecnologías propuestas tienen en el país, la industria y las normativas para poder ser implementadas y con sus resultados en el capítulo cinco se proponen y se descartan las oportunidades para implementar tecnología entre estas industrias en Colombia.

Por últimos se realizan las conclusiones, recomendaciones y se anexa una recopilación bibliográfica para profundizar los temas relacionados con la industria geotérmica de media y alta entalpia. Donde se describe la energía geotérmica desde la parte de ingeniería y como son utilizados las mismas herramientas y tópicos que se usan en la industria de los hidrocarburos; exploración, yacimientos, perforación, completamiento y producción, además de ello se muestran las tendencias mundiales y la producción actual de la misma.

1. PANORAMA ACTUAL DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA

En cuanto al recurso geotérmico, Colombia cuenta con una posición geográfica privilegiada y una geología favorable, dado que parte del territorio se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura del subsuelo, cerca de la superficie, es anómalamente alto y se manifiesta con la actividad volcánica y otras manifestaciones geotermales.

La energía geotérmica en Colombia es explotada principalmente para usos directos, en el turismo (baño y nado) y calefacción en menor uso; Sin embargo, es necesario explorar el potencial de otros usos; como la generación de energía. Aunque Colombia es rica en la generación de energía, donde su fuente principal es hidroeléctrica, otras fuentes como la energía geotérmica son estratégicas para diversificar la matriz energética.

Colombia tiene una capacidad eléctrica basada en 9.800 MW de energía hidroeléctrica, 4.680 MW de energía térmica proveniente de la combustión del carbón y el gas producidos internamente y unos 18 MW de energía eólica, para un total instalado de 14.500 MW.²

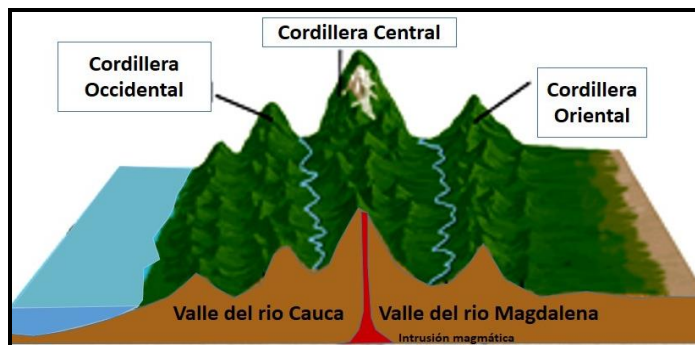
Un yacimiento geotérmico requiere características tectónicas especiales, en el cual ciertas condiciones geológicas, hidrológicas, estructurales y físicas, coexisten.³ En Colombia evidencia este potencial geotérmico en zonas contiguas a los volcanes Chiles, Cerro Negro, Cumbal, Azufral, Galeras, Doña Juana, Sotará, Puracé, Nevado del Huila, Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima los cuales están ubicados en el punto triple de las placas de Nazca, Caribe y Sudamérica. En la figura 1 puede verse una sección transversal de los andes colombianos, donde se evidencia la existencia de intrusiones magmáticas que dan lugar a las manifestaciones geotermales.⁴

² Mejía et al. Geothermal development in Colombia. Marzo 2014.

³ Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. Utilización de la Energía Geotérmica – Documento Descriptivo. 21/03/03.

⁴ Geothermal Activity in South America: Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, and Perú. Ingimar g. Haraldsson. United Nations University Geothermal Training Programme. 2012.

Figura 1. Sección transversal de los Andes Colombianos.



Modificado de: Ingimar G. Haraldsson. *Geothermal activity in South America: Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, and Perú.* 2013.

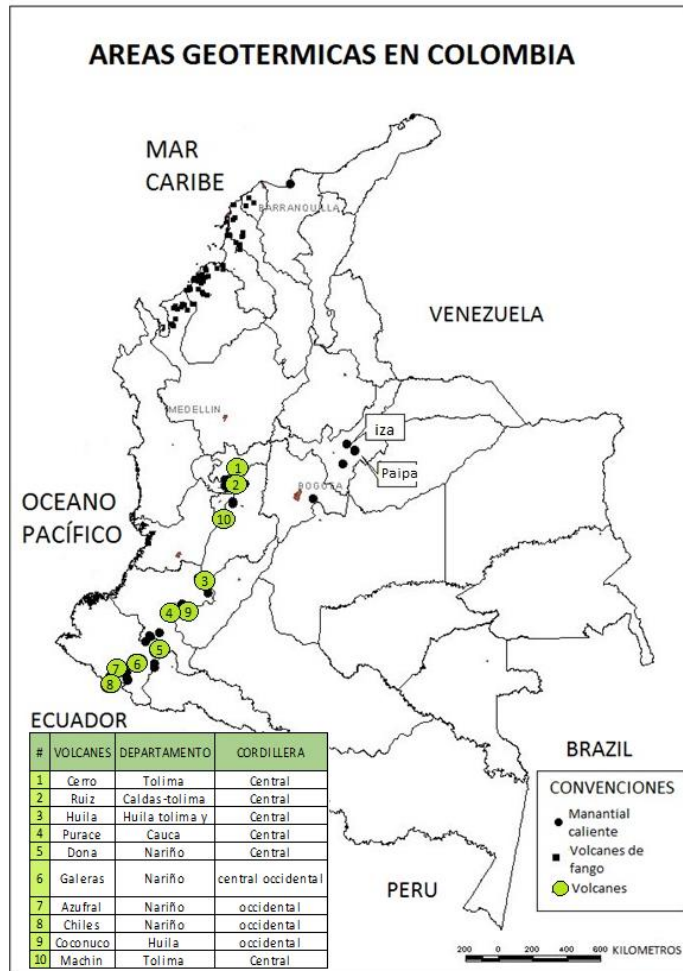
Colombia posee volcanes ubicados la mayoría en las cordilleras central y occidental. De ellos 15 son actualmente activos. El macizo volcánico más estudiado son los nevados del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, en la cordillera central debido a erupciones en 1845 y 1985 dejando un saldo de 1000 y 25000 muertos respectivamente y pérdidas materiales en el valle del Magdalena. Esta última hizo desaparecer el municipio de Armero (Tolima).

La tabla 1 revela los volcanes de Colombia con su respectiva altura y departamento y en la figura 2 se encuentran geo referenciados en el mapa de Colombia, donde puede asegurarse que los recursos geotérmicos con más perspectivas; están ubicados en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Huila, Risaralda, Quindíola, Nariño y Tolima donde la mayor elevación es el volcán Huila con 5750msnm.

Tabla 1. Volcanes de Colombia.

NOMBRE	ALTURA msnm	DEPARTAMENTO	NOMBRE	ALTURA	DEPARTAMENTO
Altos Mellizos	-	CALDAS	Las Animas	4242	Nariño
Azufral	4070	Nariño	Machín	2750	Tolima
Bordoncillo	3600	Nariño	Morasurco	3520	Nariño
Cerro Bravo	4000	Tolima	Pan de	4670	Huila y Cauca
Cerro Negro	4480	Nariño	Patascoy	3500	Nariño y
Cerro Tusa	-	Antioquia	Petacas	3100	Nariño y Cauca
Chiles	4718	Nariño - Carchi	Puracé	4646	Huila y Cauca
Cumbal	4764	Nariño	Quindío	4760	Quindío, Risaralda
Cutanga	4300	Cauca y Huila	Ruiz	5321	Caldas y Tolima
Doña Juana	4500	Nariño y Cauca	San Diego	3600	Caldas
El Cisne	4800	Caldas y Tolima	Santa Isabel	4965	Caldas, Risaralda
Faroles de	-	Caldas	Sotará	4400	Cauca
Galeras	4276	Nariño	Tolima	5216	Tolima
Huila	5750	Huila, Cauca y Tolima			

Figura 2. Manifestaciones geotérmicas en Colombia.



Modificado de: Alfaro et al., (2003).

1.1. DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Por ahora, como se evidencia en un informe de Upme. Utilización de la energía geotérmica documento descriptivo. (Documento ANC-0603-21-00) 2003, se ha dado usos directos a los recursos geotérmicos, principalmente en 38 balnearios de 27 localidades. La capacidad de la energía usada se estima en 7 TJ/año en cada uno de ellos, debido a su uso, por lo tanto se concluye que Colombia no es un país productor de energía geotérmica, pues los 266 TJ/año evidencian el potencial natural como manifestaciones geotérmicas. Sin embargo el desarrollo de la energía geotérmica a escala industrial no se ha desarrollado a pesar de que en el país se han realizado diversos estudios desde la

década del 70 sobre el potencial geotérmico y de la existencia de políticas de Estado para promoverla.⁵

Cronología de estudios geotérmicos en Colombia:⁶

- Estudio de reconocimiento de campos geotérmicos existentes entre Colombia y Ecuador, entre otros países (evaluación de potencial), elaborado entre 1979 y 1982 por OLADE, Aquater, BRGM y Geotérmica Italiana.
- Estudios de prefactibilidad de desarrollo geotérmico en las áreas de Chiles - Tufiño - Cerro Negro (INECEL - OLADE 1982; OLADE – ICEL 1986- 1987).
- Estudios de prefactibilidad de desarrollo geotérmico en las áreas del Complejo Volcánico Nevado del Ruíz (CHEC 1983; Geocónsul 1992; GESA 1997).
- Nuevas tecnologías de generación (ISAGEN-1997).
- Mapa Geotérmico de Colombia. Ingeominas 2000.
- Nuevas tecnologías de generación, actualización y viabilidad en Colombia (ISAGEN, UNAL - 2004).
- Estudios de investigación de los sistemas geotermales de las áreas de los Volcanes Azufrales, Cumbal (Ingeominas 1998-1999, 2008-2009; Ingeominas - Universidad Nacional de Colombia 2006).
- Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia (ISAGEN, COLCIENCIAS, Universidad de los Andes, Universidad Nacional de Colombia. 2006-2008).
- Mapa Geotérmico de Colombia. Ingeominas - ANH 2008.
- Factibilidad básica para el desarrollo de un proyecto geotérmico en Colombia (ISAGEN, INGEOMINAS, USTDA - 2008).
- Estudios de investigación de los sistemas geotermales de las áreas de Paipa e Iza (Ingeominas 2005, 2008-2009).

⁵ Upme. Utilización de la energía geotérmica documento descriptivo. Doc. ANC-0603-21-00. 2003.

⁶ Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. Convenio BID, ISAGEN (2012).

La investigación geotérmica en Colombia está liderada por entidades como ISAGEN, Servicio Geológico Colombiano (SGC), Empresas Públicas de Medellín (EPM) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), que están desarrollando estudios de prefactibilidad y reglamentarias en materia de uso de energía geotérmica en el país. Los estudios desarrollados por las empresas de energía eléctrica y organismos gubernamentales están en las primeras etapas de desarrollo.

En el año 2009 ISAGEN promueve y gestiona los recursos y la suscripción de convenios de cooperación para la realización de los estudios de prefactibilidad técnica, económica y ambiental de dos proyectos geotérmicos; El Proyecto Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruíz y el Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro, los cuales inician su fase de ejecución a partir del 2010 con:

- Programa estratégico para el modelamiento del sistema hidrotermal magmático para el Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz. Los estudios incluyen la toma de fotografías aéreas y restitución cartográfica, levantamiento de geología de detalle, estudios de geoquímica, hidrogeología, geofísica (gravimetría y magnetometría) y perforación de pozos de gradiente térmico (ISAGEN, UNAL, INGEOMINAS y COLCIENCIAS 2010 - 2012).
- Modelación de la estructura resistiva del subsuelo por sondeos magnetotelúricos para el Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz. Capacitación y entrenamiento en la aplicación de la tecnología de magnetotelúrica (ISAGEN, INGEOMINAS, CIF, UNAM y COLCIENCIAS 2011 - 2012).⁷
- Estudios de prefactibilidad sobre recursos geotérmicos en dos áreas seleccionadas ubicadas en el Macizo Volcánico del Ruíz. Los estudios incluyen la elaboración del modelo geotérmico conceptual, selección de sitios para perforación exploratoria, diseño de infraestructura (pozos, plataformas y vías de acceso) y estudios ambientales para el desarrollo de la fase de factibilidad del Campo Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruíz. Colombia (ISAGEN, BID/Fondo Japonés 2011 - 2012).

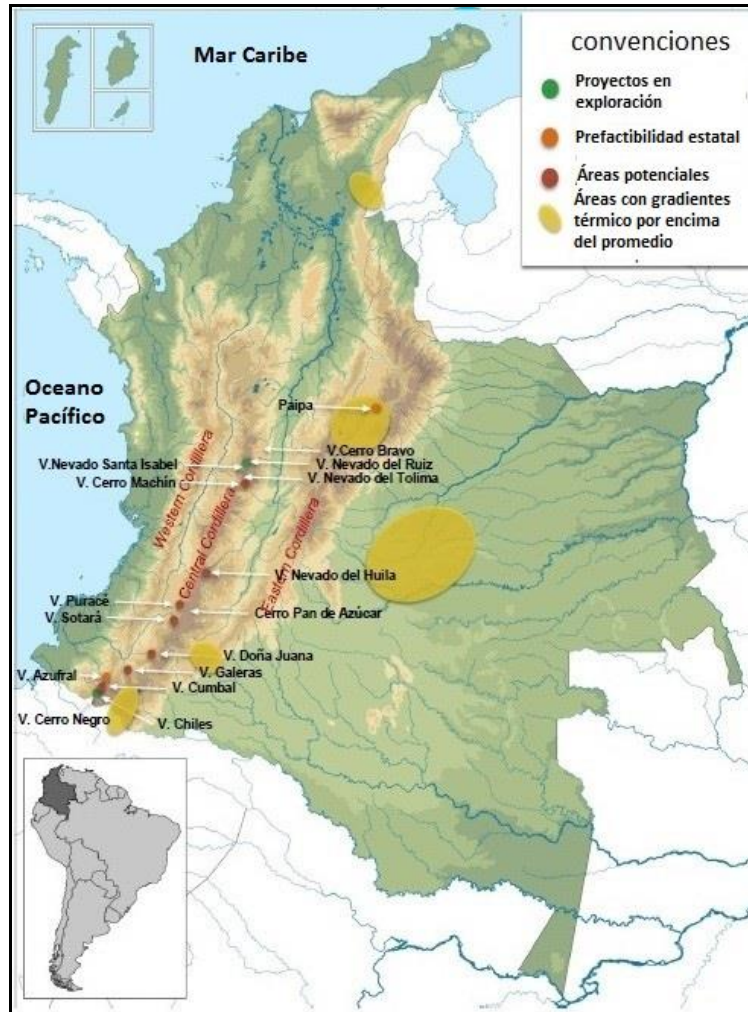
⁷ Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. Convenio BID, ISAGEN (2012).

- Inversiones catalizadoras para energía geotérmica. Complementación del modelo resistivo del subsuelo, asesoría y acompañamiento etapa de perforación exploratoria. (ISAGEN, BID/GEF 2011 - 2014).
- Estudio de prefactibilidad para el desarrollo del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño - Chile - Cerro Negro. Los estudios incluyen la toma de fotografías aéreas, restitución cartográfica, estudios de geología de detalle, geofísica, geoquímica, hidrogeología, perforación de pozos de gradiente geotérmico y estudios ambientales para el desarrollo de la fase de factibilidad (ISAGEN, CELEC EP 2011- 2014).
- El Servicio Geológico Colombiano (SGC) «plan de investigación geotérmica (SGC, 2014) incluye estudios de reconocimiento y prefactibilidad en algunas áreas, como la de Paipa, Volcán Azufral, el Volcán Nevado del Ruíz, San Diego Maar, Volcán Cerro Machín y la zona de Santa Rosa. En general, los estudios se han centrado en la adquisición de información geofísica y actualizar los modelos conceptuales. Además, se ha proyectado cinco pozos de gradiente térmico y una perforación de pozo profundo en el área de Paipa y otro en la zona del Volcán Azufral.
- Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM) y su filial central Hidroeléctrica de Caldas SA (CHEC) están actualmente evaluando el potencial geotérmico en el Valle de Nereidas cerca del volcán Nevado del Ruiz, se investiga que el área de estudio tiene el potencial geotérmico significativo.⁸
- La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) ha avanzado algunos estudios normativos con el fin de promover las fuentes de energía no convencional, incluida la energía geotérmica, a través de la elaboración del mapa de potencial geotérmico y un estudio sobre el estado actual de las energías renovables y su plan de desarrollo.

En la figura 3 se muestra la zona del nevado del Ruíz con un proyecto en exploración, El volcán Azufral y el área de Paipa (Boyacá) en estado de prefactibilidad estatal, la cordillera central que presenta varios puntos con potencial y las zonas en amarillo, presentan un gradiente térmico anormal por encima del promedio. Por lo tanto de aquí se desglosan los proyectos que se mencionan a continuación.

⁸ Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. Convenio BID, ISAGEN (2012).

Figura 3. Zonas potencialmente geotérmicas en Colombia.



Modificado de: Unidad de planeación minero energética (Upme). Estudios geotérmicos. (2013).

1.1.1. Proyecto macizo volcánico del Ruíz. ISAGEN desde 2010 hasta hoy ha desarrollado estudios de exploración en un área de 200 km² alrededor del Volcán Nevado del Ruiz. Las actividades incluyen una restitución cartográfica, geología estructural, alteración hidrotermal, el análisis de inclusiones fluidas, geoquímica de las aguas termales, la hidrogeología y la geofísica. Anomalías de estudios de superposiciones de magnetometría y gravimetría, y los lineamientos estructurales, dentro de los resultados hasta ahora ha permitido identificar áreas con gradientes térmicos potencialmente anómalos cerca de la superficie. En 2011, ISAGEN perforó tres pozos de gradiente térmico, alcanzando 300 m de profundidad.

Un estudio de perfil térmico se realizó con 200 sondeos y con ello se elaboró un modelo de perfil térmico inverso en 3D. Como resultado, se obtuvo un modelo geotérmico conceptual, y se definieron cinco pozos exploratorios con profundidades desde 1700 a 2700m, la temperatura promedio esperada del yacimiento geotérmico es de 200°C en un yacimiento naturalmente fracturado. Actualmente la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) se encuentra evaluando el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), para los pozos exploratorios; incluyendo el diseño de los pozos, plataformas y carreteras.⁹ En la figura 4 los núcleos obtenidos muestran, principalmente andesitas con zonas de fractura y alteración propilítica atravesados por venas de calcita.

Según Mejía et al (2014), la siguiente etapa, prevista a ejecutar en los próximos dos años, es la perforación de pozos exploratorios y de evaluación de yacimientos, desarrollo de la planificación y el diseño en campo de las plantas. Se espera para 2018 la construcción y operación de una central eléctrica de 50 MW.

Un importante resultado de los estudios llevados a cabo en asociación con el Instituto Geológico Colombiano, el Departamento Administrativo de Ciencia, tecnología e innovación (COLCIENCIAS) y la Universidad Nacional de Colombia fue el fortalecimiento técnico e institucional, los convenios dejaron un moderno equipo de laboratorio y de campo para la exploración geotérmica y otras aplicaciones geológicas y vulcanológicas. Así como también formación exploratoria de alto nivel con lo cual se unifica la competitividad compartida para el desarrollo de la energía geotérmica en el país.

Figura 4. Corazones recuperados Nevado del Ruíz.



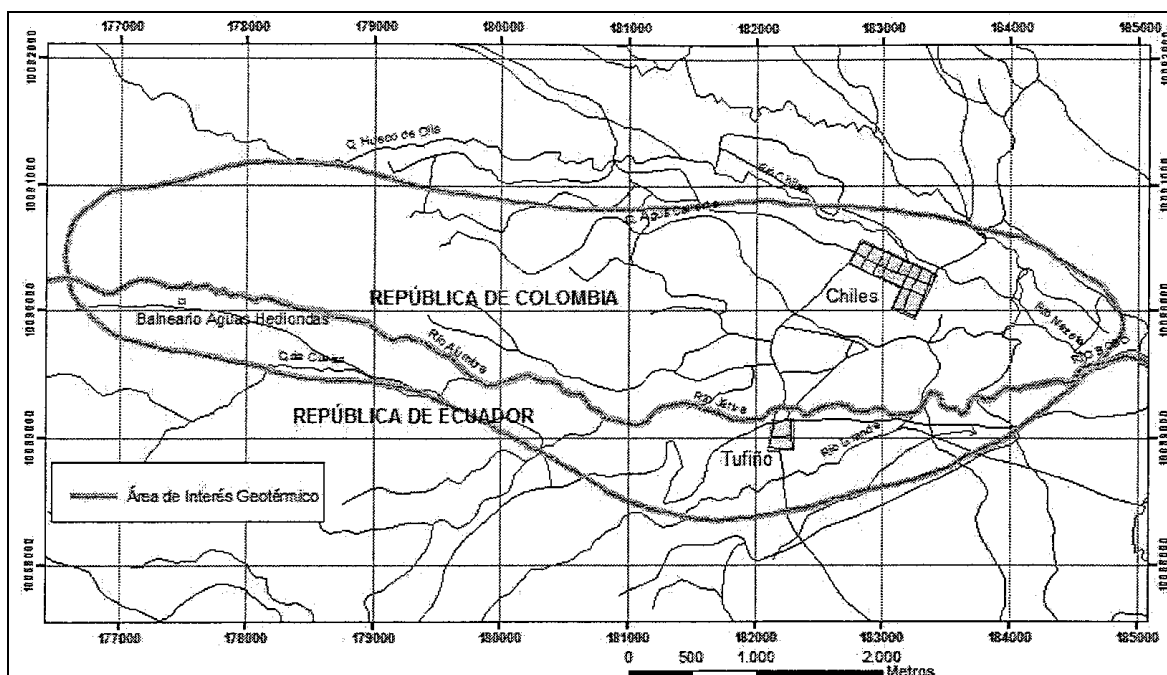
Tomado: Mejía et al. (2014).

⁹ Mejía Eliana et al (2014).

1.1.2. Proyecto binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro. En julio de 2010 se crea el convenio binacional entre los gobiernos de Ecuador y Colombia; con el fin de estudiar el potencial geotérmico identificado en la zona limítrofe entre estos. En 2012, el 5 de abril se firmó el acuerdo de cooperación técnica entre ISAGEN S.A (Colombia) y la Corporación Eléctrica de Ecuador CELEC EP (Ecuador) con el fin de continuar con el estudio de prefactibilidad del proyecto, el área en desarrollo comprende 49000 Ha y se espera poder instalar un potencial de 138 MW.

Desde el 2012 hasta hoy ambas empresas se han enfocado en la exploración geotérmica del área y la socialización del proyecto, restitución cartográfica, fotografías aéreas. Por otra parte realizan geología general y estructural, elaboración de mapas de alteraciones hidrotermales y geoquímica, para continuar con los estudios magnetoteléuticos, la elaboración del modelo geotérmico conceptual y los pozos de gradiente geotérmico. Con el objetivo de seleccionar los target point de los objetivos exploratorios, diseño de los pozos, carreteras y plataformas y por último los estudios de impacto ambiental.

Figura 5. Área de acuerdo binacional Tufiño-Chiles.



Tomado de: Ibarra J. 2010.

El área de interés geotérmico de Tufiño está ubicada en el flanco oriental de la cordillera occidental de los Andes, como una franja paralela a la frontera con Colombia, cerca de los volcanes Chiles (4730m) y Cerro Negro (4470 m); la línea fronteriza Colombo-Ecuatoriana

cruza por las cumbres de los volcanes antes mencionados y divide el área de interés en dos mitades como se evidencia en la figura 5.

El volcán Chiles es la mayor elevación de esta parte de la cordillera Andina en la cual la altura media oscila alrededor de 4000m. Las zonas más elevadas corresponden al páramo andino y están cubiertas por una vegetación herbácea de pajonales. El clima es básicamente de tipo paramo y mesotérmico húmedo y semi-húmedo, en la zona del proyecto la temperatura oscila alrededor de 9°C y la subestación eléctrica “la Palizada” (138/69/13,8 Kv) está alejada del proyecto unos 15 Km del centro del área de interés.

Con base en las investigaciones geofísicas ecuatorianas, que se realizaron como parte de los estudios, el área de máximo interés geotérmico quedo restringida a una zona de alrededor de 14 km² que se extiende entre los alrededores del volcán Tufiño y las manifestaciones termales de “ Agua Hediondas”, con elevaciones comprendidas entre 3120-3580m.¹⁰

Cuando están disponibles solo algunos parámetros fundamentales del sistema geotérmico, (Muffler et al (1979)) han demostrado que el método Volumétrico es el más confiable de los métodos que pueden aplicarse en las etapas intermedias de la exploración. Es así como fueron usadas por Inecel (1990) resultando lo descrito en la tabla 2. Donde se puede evidenciar las propiedades petrofísicas; la porosidad del yacimiento es de 30% y la del basamento 20% lo cual indica que dentro del sistema geotérmico las dos formaciones con espesor promedio 1.5 Km pueden ser explotadas. Sin embargo es probable la necesidad de usar el fracturamiento hidráulico porque las porosidades efectivas están en el orden del 2 a 3 %. Geoquímica y energéticamente la reserva se encuentra a una temperatura de 230°C, la capacidad instalable por km² es de 31.29 y 14.45 MW/km² respectivamente en un área de 4 km² y como resultado una capacidad instalada total de 201 MW de energía que equivale al 26 por ciento de la reserva geotérmica debido al factor de conversión a electricidad, que al ser aprovechadas, podrían aportar a la canasta minero energética del país.

¹⁰ Ibarra, Primera Conferencia Nacional de Energía Geotérmica en el Ecuador. Geotermia en el Ecuador: Una Hoja de Ruta para su Desarrollo Sustentable (2010).

Tabla 2. Evaluación del potencial geotérmico volcán Tufiño (ecuador).

Parámetro	Unidad	Elementos del sistema geotérmico				Total
		Cobertura	C. sello	Reservorio	Basamento	
Superficie	Km ²	38.29	38.29	38.29	38.29	38.29
Espesor promedio	Km	0.5	1	0.5	1	
Volumen total	Km ³	19.14	38.29	19.14	38.29	114.86
Porosidad total	%	30	5	30	20	
Porosidad Efectiva	%	6	0.01	3	2	
Volumen de roca	Km ³	13.4	36.37	13.4	30.63	93.81
Volumen de fluido	Km ³	5.74	1.91	5.74	7.66	21.06
Temp superficial ref.	°C	9	9	9	9	
Temp. Media capa	°C	106.33	166.67	206.67	240	
Densidad prom roca	g/Cm ³	2.5	2.2	2.7	2.7	
Densidad prom fluidos	g/Cm ²	0.95	0.92	0.85	0.81	
Calor especifico roca	Cal/g°C	0.27	0.27	0.22	0.22	
Calor especifico fluido	Cal/g°C	1	1	1.06	1.06	
Entalpia de la roca	Cal/g	8.80E+17	3.40E+18	1.60E+18	4.20E+18	1.00E+19
Entalpia del fluido	Cal/g	5.30E+18	2.80E+17	1.00E+18	1.50E+18	3.40E+18
RGBA	J	5.91E+18	1.54E+19	1.09E+19	2.40E+19	5.62E+19
RGBA por unidad de A.	J/Km ²	1.54E+17	4.03E+17	2.84E+17	6.26E+17	1.47E+18
Factor de recobro	%	15.00	0.03	7.50	5.00	
Recurso geotermico economico	J	8.86E+17	3.86E+15	8.15E+17	1.20E+18	2.90E+18
Profundidad media de la reserva	m	250	1000	1750	2500	
Reserva geotermica	J	3.06E+17	1.94E+14	1.34E+17	5.30E+16	4.93E+16
Factor de conversión a electricidad	%	0.00	0.00	0.24	0.28	
Energia primaria	Kw-h	0.00	0.00	8.92E+09	4.12E+09	1.30E+10
Productividad específica	Kw-h/Km ²	0.00	0.00	2.33E+08	1.08E+08	3.41E+08
capacidad intalable por Km ²	Mw	0.00	0.00	31.29	14.45	45.74
Area topograficamente Util	Km ²	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40
Potencia instalable total	Mw	0.00	0.00	138.00	64.00	201.00

Modificado de: Ibarra julio de 2010.

1.1.3. Proyecto geotérmico de Azufral. El Azufral es un estratovolcán compuesto, formado en su base por un volcán más antiguo cuya porción somital está hundida por un colapso caldérico; después del colapso, la actividad se ha reanudado mediante el emplazamiento de domos endógenos.

Los elementos de interés geotérmico son los siguientes:

- Edad reciente del volcán y larga persistencia de su actividad a través del tiempo (al menos 400.000 años)

- Evolución magmática completa de sus productos volcánicos emitidos, desde andesitas hasta riolitas.

Los anteriores elementos se relacionan con la presencia de una cámara magmática de alimentación del volcán Azufral que se identifica con una fuente de calor considerable.

- Presencia de cráteres de explosión freática en el interior de la caldera.
- Presencia de actividad fumarólica y de numerosas manifestaciones termales.
- Presencia de un sustrato constituido por volcanitas terciarias.
- Presencia de fragmentos rocosos hidrotermalizados con fases típicas de reservorios geotérmicos.

Estos últimos elementos indican la existencia de un reservorio de alta temperatura por debajo del edificio volcánico del Azufral.

“A finales de 1999 el BID aprobó un financiamiento concesional al Gobierno de Colombia (Proyecto TC-97-06344-CO); el objetivo de esta cooperación técnica no reembolsable es apoyar el financiamiento de la Fase I de los estudios de factibilidad del campo geotérmico de Azufral, el cual consiste en un conjunto de estudios geo-científicos y ambientales”.¹¹

Los resultados de estos estudios permitirían al Gobierno de Colombia y a sus agencias considerar la participación del sector privado en el desarrollo de este recurso natural. El costo total de la fase 1 se estima en US\$1.300.000, de los cuales el 70% provendría de un aporte del Japan Consultant Fund.¹²

Posteriormente como resultados de estudios de magnetometría y la gravimetría medidas en campo (Ponce. (2013)). Teniendo en cuenta la geología y la geomorfología de la zona, permitió obtener varios modelos, basados en perfiles escogidos y trazados sobre los mapas de anomalía magnética residual y anomalía residual de Bouguer para estimar la estructura del subsuelo, la cual en su mayoría se encuentra compuesta por rocas ígneas de diferente composición y depósitos piroclásticos de diferentes volcanes.

¹¹ Manlio F. Coviello. Cepal, PROYECTO OLADE/CEPAL/GTZ Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional “Tufiño-Chiles- Cerro Negro”. (2000).

En los modelos del subsuelo obtenidos, observaron zonas cuyos valores de densidad son bajos y con susceptibilidad magnética muy baja, lo cual podría deberse al aumento de la temperatura producido por la actividad volcánica. También observaron altos gravimétricos con susceptibilidad magnética baja, lo cual podría deberse a alteración hidrotermal de las rocas.

Los gradientes estimados con el método espectral varían entre 150°C/km y 250°C/km podrían indicar un reservorio de media a alta temperatura ubicado a menos de 2 km de profundidad, que es acorde con temperaturas encontradas por geotermómetros en pasados trabajos del Ingeominas.¹³

Encontraron zonas que coincide con altos valores de flujo de calor y cuya descripción geológica las cataloga como cuencas que albergan unidades no consolidadas con porosidad primaria y grado de compactación bajo, que podría indicar presencia de fluidos calientes.

Los mapas de flujo de calor estimados para la zona estudiada, muestran áreas donde estos valores son mayores que los promedios normales del planeta, que pueden indicar zonas interesantes para realizar perforaciones y confirmar el valor del gradiente térmico estimado con el método espectral, confirmar la presencia de fluidos calientes y que podrían ser considerados importantes para proyectos de prospección geotérmica de media a alta temperatura.

1.1.4. Proyecto geotérmico de Paipa. Anteriormente, el área se identificaba como Paipa - Iza, pero, estudios de prefactibilidad posteriores que incluyeron geología y geoelectrónica, indicaron que desde el punto de vista geotérmico, Paipa e Iza constituyen dos áreas completamente separadas, presentándose la de Paipa como la más atractiva de las dos.

El proyecto está localizado en la Cordillera Oriental en las cercanías de Paipa (Boyacá). El área se caracteriza por la predominancia de rocas sedimentarias esencialmente cretáceas y terciarias y la presencia de eventuales cuellos volcánicos con edad aproximada de 2.5 millones de años.

¹³ Ponce, A. Exploración de Recursos Geotérmicos del Volcán Azufraal a partir de la Interpretación de Potenciales de Anomalías de Campos. 2013.

Existen manifestaciones termales de alta temperatura, probablemente por la presencia de una intrusión magmática de carácter ácido, localizada a una profundidad de 5 Km. Se destaca la posible presencia de dos acuíferos térmicos en rocas sedimentarias granulares y silíceas con permeabilidad predominantemente secundaria. Los reservorios estarían localizados a una profundidad entre los 1.500 y 3.000 m.¹⁴

1.2. MARCO NORMATIVO Y AMBIENTAL DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA

Es evidente que Colombia es un país potencialmente geotérmico desde hace unos 30 o más años, según estudios que se han realizado nacional e internacionalmente. Sin embargo es inexistente un marco regulatorio encaminado en el desarrollo de las actividades de energía geotérmica en Nuestro territorio, y apenas ya que estamos ubicados en el cinturón de fuego del pacífico y que la tecnología mundialmente ya ha sido desarrollada de manera económicamente rentable.

La historia de nuestro querido territorio nos muestra por una parte como se desgasta la maquinaria legislativa y jurídica en varios aspectos fundamentales que atañe a toda la población como los siguientes:

Una guerra interna de más de 50 años debido a las diferencias sociales, económicas, culturales y políticas que dieron origen diferentes grupos de guerrillas de extrema izquierda. Una inclusión narco-paramilitar de extrema derecha en los más destacados puestos políticos y públicos; senado, cámara, gobernaciones, alcaldías, consejos y en diferentes entes del estado, pudiendo llegar incluso a la honorable presidencia de la república con algunas acusaciones que están en marcha en la actualidad contra el expresidente hoy congresista de la República; senador Alvaro Uribe Vélez. Una lucha contra el narcotráfico que ha dejado centenares de muertos, terror y que montó toda una red de corrupción político-administrativa a lo largo y ancho de todo nuestro país.

Adicionalmente como la misma apertura económica interviene en Colombia para darle rienda suelta a las políticas minero-energéticas y también de recursos naturales, hasta un punto de entregar todo a cambio de nada como las siguientes: cambio de los contratos de

¹⁴ Manlio F. Coviello, C. PROYECTO OLADE/CEPAL/GTZ Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional "Tufiño-Chiles- Cerro Negro". (2000).

asociación por la concesión en la industria de los hidrocarburos; con la creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). La privatización de las empresas estatales. La llamada confianza inversionista, que no es otra cosa que mostrarnos atractivamente para los extranjeros con políticas tributarias que beneficien a las multinacionales principalmente; con el fin de compensar en la balanza de riesgos de los inversionistas a la hora de estudiar la matriz de riesgos para la implementación de proyectos. Una centralización de las regalías y una lenta e inaceptable adjudicación de licenciamiento ambiental por parte de la ANLA y un pésimo acompañamiento en la ejecución de los proyectos minero energético por parte de esta misma.

Por todo lo anteriormente mencionado y sumándole que en Colombia los puestos estatales estratégicos para el desarrollo de las políticas y desarrollo de proyectos minero-energéticos están a cargo principalmente de Abogados y economistas hace obstaculizar el interés directo de los entes territoriales ante proyectos de gran envergadura ingenieril. Teniendo que ser sometidos en muchos aspectos a las normativas que sean importadas por las mismas multinacionales interesadas.

Cualquier persona involucrada en el desarrollo de infraestructura conoce muy bien los efectos que tienen los proyectos en las comunidades locales. Estos efectos pueden ser positivos o negativos, pero la experiencia dice que los conflictos sociales y políticos parecen ser una parte inevitable del proceso de desarrollo. En lugares con crisis social, política y económica existente, el riesgo de conflicto es alto y comienza en las primeras etapas de exploración y planificación.

La energía geotérmica de media y alta temperatura es tan parecida a la explotación de yacimientos de hidrocarburos que pudiera confundirse para los pobladores de las zonas de interés, principalmente en las primeras etapas del proyecto; por lo tanto lo primero que debe hacerse y muchas veces es olvidado es la integración de la comunidad en este tipo de proyectos, con un agravante que en últimas puede ser el mejor aliado y es que los proyectos geotérmicos a diferencia de la explotación de yacimientos hidrocarburos son de un tiempo explotable mayor ya que los reservorios pueden acondicionarse para ser explotados por varias décadas si se usa tecnología de reinyección de agua, desde que la fuente de calor no pierda sus propiedades termodinámicas dentro del yacimiento.

1.2.1. Esquema institucional. El Ministerio de Minas y Energía es el órgano encargado de regular, administrar, formular, adoptar e implementar las políticas nacionales en cuanto: hidrocarburos, minerales, biocombustibles, energía eléctrica, fuentes alternativas de energía, nuclear, de la totalidad de las fuentes energéticas del país, así como también del aprovechamiento integral de los recursos naturales no renovables y el desarrollo de los programas de uso racional y eficiente de energía en afinidad con los planes de desarrollo.¹⁵

Unidades adscritas al MME (Unidades Administrativas Especiales).

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME:

Es una unidad administrativa especial de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, dotada de personería jurídica, patrimonio propio y autonomía presupuestal, creada por el Decreto 2119 de 1992, posteriormente regulada por las leyes 142 y 143 del 11 de julio de 1994 y reglamentada por el Decreto No. 28 del 10 de enero de 1995.¹⁶

Una de las principales tareas es orientar, con información útil para el diseño de políticas y la toma de decisiones, a los agentes públicos y privados involucrados, garantizando el óptimo aprovechamiento de los recursos no renovables y el adecuado y eficiente abastecimiento de la demanda de minerales y energía. Esa tarea supone realizar análisis, estudios y evaluaciones sobre la situación y las perspectivas de las industrias mineras y energéticas.

Bajo este esquema, la UPME realiza anualmente una revisión del plan de expansión eléctrico de referencia; este tiene como objetivo final, proveer información actualizada y señales oportunas de corto, mediano y largo plazo a los diferentes agentes sobre las oportunidades de inversión en el sistema eléctrico, inversiones requeridas para garantizar un suministro confiable y eficiente de la electricidad demandada para el desarrollo del país.

¹⁵ MME, 2014. Web: <http://www.minminas.gov.co/>. [consultado el 14 de mayo de 2014].

¹⁶ Manlio F. Coviello, C. PROYECTO OLADE/CEPAL/GTZ Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional “Tufiño-Chiles- Cerro Negro”. (2000).

Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG:

Es la encargada de la regulación técnica y económica del sector. El 29 de diciembre de 1992, el gobierno expidió el decreto 2119 creó la Comisión de Regulación Energética (CRE), reestructurando el Ministerio de Minas y Energía. Luego, con la expedición de las leyes 142 y 143 de 1994 la CRE se transformó en la CREG, organizándola como una Unidad Administrativa Especial del MME, compuesta de la siguiente manera: la preside el Ministro de Minas y Energía; el Ministro de Hacienda y Crédito Público; el director del DNP y cinco expertos en asuntos energéticos nombrados por el presidente de la República por períodos de cuatro años. El superintendente de servicios públicos es invitado permanente a sus reuniones con voz pero sin voto.

La CREG, tomando como base los desarrollos regulatorios que había efectuado la CRE, diseñó, reglamentó e implementó el nuevo marco institucional y regulatorio del sector eléctrico y de gas. En el caso eléctrico, el modelo básico adoptado es similar al esquema inglés, no obstante presenta importantes variantes con relación al mismo, en especial en lo relativo al negocio de comercialización de electricidad.

Las primeras resoluciones expedidas por la CREG para el sector eléctrico, datan de finales de 1994 y desarrollan en general los siguientes temas: marco regulatorio aplicable a las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización. Las resoluciones reglamentan los aspectos empresariales, comerciales, técnicos y operativos de estos negocios.¹⁷

Establecimientos públicos:

Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear – INGEOMINAS:

Es un establecimiento público adscrito al Ministerio de Minas y Energía, que desempeña funciones básicas como servicio geológico y del medio ambiente, como centro de investigación y desarrollo del sector minero y como entidad de la información en ciencias y tecnologías de la tierra en el país.

¹⁷ Manlio F. Coviello, C. PROYECTO OLADE/CEPAL/GTZ Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional “Tufiño-Chiles- Cerro Negro”. (2000).

La última reestructuración del Servicio Geológico Colombiano (anteriormente INGEOMINAS) se realizó el 28 de enero de 2004 dándole como objeto realizar la exploración básica para el conocimiento del potencial de recursos y restricciones inherentes a las condiciones geológicas del subsuelo del territorio colombiano; promover la exploración y explotación de los recursos mineros de la Nación y participar, por delegación, en actividades relacionadas con la administración de dichos recursos. En lo sucesivo la entidad se denominará Instituto Colombiano de Geología y Minería y continuará utilizando la sigla Servicio Geológico Colombiano (anteriormente INGEOMINAS). Dicha reestructuración se realiza mediante el decreto 252 de enero 28/04¹⁸.

Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas, IPSE:

Adscrito al Ministerio de Minas y Energía, se encarga de mejorar las condiciones de vida de las comunidades, a través de la identificación, elaboración, promoción y viabilización de proyectos para llevar energía a las localidades que no la poseen o donde la prestación del servicio es deficiente.

Estas zonas representan el 52% del territorio nacional, el cual incluye 90 municipios, 1.448 localidades, 39 cabeceras municipales, de las cuales 5 son capitales de departamento y 20 territorios especiales, biodiversos y fronterizos.¹⁹

Esta gran extensión del territorio nacional cuenta con importantes recursos hídricos y riqueza natural representada en la fauna, flora y paisajes, donde habitan más de 1'400.000 colombianos: raizales, indígenas, afro descendientes y mestizos que conforman esta diversidad étnica y cultural incomparable. El IPSE trabaja permanentemente en la búsqueda de proyectos para llevar energía a estas regiones apartadas, con tecnologías amigables con el medio ambiente, que permitan a sus comunidades disfrutar los beneficios que este servicio conlleva.

¹⁸ INGEOMINAS 2014. Web: <http://www.sgc.gov.co/> [consultado el 15 de mayo de 2014].

¹⁹ IPSE. 2014. Web: <http://www.ipse.gov.co/ipse/informacion-institucional/ipse>. [revisado enero 2014].

Entidades Vinculadas:

- Empresa Colombiana de petróleo, Ecopetrol.
- Empresa Colombiana de Gas, Ecogás. (VENDIDA)
- Empresa Nacional Minera Ltda., Minercol.
- Interconexión Eléctrica S.A., E.S.P. ISA
- Isagén S.A. E.S.P.
- Empresa Multipropósito Urrá S.A. E.S.P.
- Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica, CORELCA S.A. E.S.P.
- Carbones de Colombia S.A., Carbocol. (VENDIDA)
- Financiera Energética Nacional, FEN.

Para el impulso de proyectos de infraestructura nacional y especialmente del sector minero-energético como es el caso que compete en este estudio. Es preciso anotar la responsabilidad de todos los ministerios o gabinetes del poder ejecutivo que se integran en el gobierno y que tienen como objetivos primordiales contribuir y promover el desarrollo sostenible de la sociedad colombiana a través de la formulación y adopción de las políticas, planes, programas, desarrollo territorial y urbano, así como en materia habitacional integral.

Sin embargo para efectos prácticos es preciso mencionar los más representativos para la industria Geotérmica; como lo es el Ministerio de Relaciones Exteriores; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Hacienda y Crédito Público y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Desde los cuales se imparte la normatividad vigente que puede ser aplicada a la industria geotérmica en Colombia al no existir un marco regulatorio específico para esta.

1.2.2. Normatividad aplicable al desarrollo y explotación de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia. Teniendo en cuenta los posibles usos que se le puede dar a la energía geotérmica en Colombia; el más importante es el

relacionado con la generación de energía eléctrica, el cual tiene un marco legal bien definido solo con fuentes convencionales; hidroeléctrica y termoeléctrica principalmente.

El sector energético colombiano está conformado por distintas entidades y empresas²⁰ que cumplen diversas funciones en los mercados de generación, transmisión, comercialización, y distribución de energía. Ley 143 de 1994²¹ (“Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética”) y ley 142 de 1994 (“ley de servicios públicos domiciliarios”).

Para el desarrollo de proyectos de energía geotérmica podrían aplicarse diferentes marcos regulatorios en materia de energías alternativas; en efecto una de las funciones del Ministerio de Minas y Energía es el desarrollo de las fuentes alternas y en general, sobre todas las actividades técnicas, económicas, jurídicas, industriales y comerciales relacionadas con el aprovechamiento integral de los recursos naturales no renovables y de la totalidad de las fuentes energéticas del país.

La planeación integral del desarrollo Colombiano busca incluir los recursos mineros y energéticos que se plasman en el Plan de Ordenamiento Territorial, basándose en uno de los objetivos del gobierno, con el fin de establecer el potencial de los recursos y las necesidades de cada una de las regiones del país.

Sin embargo, la inexistencia de un marco regulatorio jurídico específico para la industria geotérmica representa en sí mismo un obstáculo, ya que la inversión es alta, al igual que el riesgo y por lo tanto necesita de incentivos para su desarrollo.

Debido a todo lo anteriormente mencionado es preciso anotar los marcos regulatorios encaminados al desarrollo de la industria en general que pueda ser aplicados para el desarrollo de la industria geotérmica en Colombia como los son: las leyes de la república, regulaciones y definiciones del MME y del código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente, los convenios internacionales pactados, normatividad ambiental, política tributaria y arancelaria, política laboral, usos del agua, desarrollo fronterizo e intercambio comercial, zonas francas y código de minas.

²⁰ Ley 142 y 143 de 1994. Congreso de la república de Colombia.

²¹ Ley 142 y 143 de 1994. Congreso de la república de Colombia.

Fuentes no convencionales de energía renovable y eficiencia energética:

Ley 1715 del 13 de mayo de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.²²

Decreto ley 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.²³

- Definen el ambiente como patrimonio común
- Regula los recursos geotérmicos.
- Define la solución de problemas asociados a yacimientos geotérmicos que se encuentren a lado y lado de una frontera.
- Establece a los recursos geotérmicos como recursos energéticos primarios.
- Capítulo vi de los recursos geotérmicos (artículos 172-177).

Ley 697 de 2001. Ley de Uso Racional de Energía URE.²⁴

- Determina el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional.
- Designa al Ministerio de Minas y Energía como la entidad responsable de promover, organizar, asegurar el desarrollo y seguimiento de los programas URE.
- Entre los objetivos se establece que el Ministerio debe promover el uso de energías no convencionales dentro del programa PROURE, estudiando la viabilidad tecnológica, ambiental y económica.

²² Ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Sitio de archivo de la presidencia de la república 2010-2015, república de Colombia. 13 de mayo de 2014.

²³ Decreto ley 2811. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de protección al medio ambiente. Sitio de archivo de la presidencia de la república 2010-2015, república de Colombia (1974).

²⁴ Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. Convenio BID, ISAGEN. Septiembre de 2012.

- Crea el programa PROURE. Ordena al Gobierno Nacional establecer los estímulos que permitan desarrollar en el país el uso racional y eficiente de la energía y las fuentes no convencionales.

Decreto 3683/2003. Reglamentación de Ley 697-2001.

- Reglamenta el uso racional y eficiente de la energía.
- Establece la Comisión Intersectorial para el uso racional y eficiente de la energía y Fuentes No Convencionales de energía (CIURE), con el fin de asesorar y apoyar al ministerio en políticas de uso racional y eficiente de energía y energía No convencional.
- Especifica lineamientos generales para el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE).
- Resolución 18060 de 2006 Definición programas PROURE: Define los subprogramas que hacen parte del programa PROURE.

Resolución 180919 de 2010. Plan Energético Nacional (PEN) 2010 – 2030.

- ✓ Incluye las fuentes no convencionales de energía en la visión a largo plazo del sector eléctrico colombiano.

Ley 1450 de junio de 2011. Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014.²⁵

- ✓ Art 105. Energías Renovables. El Gobierno Nacional diseñará e implementará una política nacional encargada de fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en las energías solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, mareomotriz y demás alternativas ambientalmente sostenibles, así como una política nacional orientada a valorar el impacto del carbono en los diferentes sectores y a establecer estímulos y alternativas para reducir su huella en nuestro país.

²⁵ Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. Convenio BID, ISAGEN. Septiembre de 2012.

Convenios internacionales y/o cambio climático:

- ✓ **Ley 30 de marzo 05 de 1990. Por medio de la cual se aprueba el convenio de Viena para la protección de la capa de ozono, Viena, 22 de marzo de 1985.²⁶**

Cooperarán en la formulación de medidas, procedimientos y normas convenidos para la aplicación de este Convenio, con miras a la adopción de protocolos.

- ✓ **Ley 164 de 1994. Colombia ratifica el Convenio Marco ONU sobre Cambio Climático.²⁷**

Colombia ratifica la Convención Marco de ONU sobre Cambio Climático.

Tiene por objetivo estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera.

- ✓ **Ley 629 de 2000. Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.²⁸**

- ✓ Colombia adopta el Protocolo de Kyoto.

- ✓ Define reglamentación del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

- ✓ **Resolución 181462 de 2004 Factor de emisión de gases de efecto invernadero.²⁹**

Adoptar el factor de emisión de 0.471 kg CO₂/kWh para el cálculo de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero para los proyectos de generación de energía con fuentes no renovables (incluyendo geotérmica).

Estímulos tributarios para la implementación de fuentes no convencionales de energía:

- ✓ **Ley 963 de 2005, Por la cual se instaura una ley de estabilidad jurídica para los inversionistas en Colombia.³⁰**

²⁶ Ley 30 de marzo 05 de 1990. Congreso de la república de Colombia.

²⁷ Ley 164 de 1994. Congreso de la república de Colombia.

²⁸ Ley 629 de 2000. Congreso de la república de Colombia.

²⁹ Resolución 181462 de 2004. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

³⁰ Ley 963 de 2005. Congreso de la república de Colombia.

- ✓ Contratos de Estabilidad Jurídica - Pactar con el Gobierno permanencia durante la vigencia del contrato, de disposiciones legales y reglamentarias que existan al momento de realizar la inversión, y que tengan aplicación favorable para la Empresa.
- ✓ A partir de 7500 smlmv los inversionistas establecen los contratos de estabilidad jurídica con la finalidad de promover inversiones nuevas.
- ✓ El Estado garantiza a los inversionistas que los suscriban, que si durante su vigencia se modifica en forma adversa a estos alguna de las normas que haya sido identificada en los contratos como determinante de la inversión, los inversionistas tendrán derecho a que se les continúen aplicando dichas normas por el término de duración del contrato respectivo.
- ✓ La vigencia no podrá ser superior a 20 años (Art. 6). Este tipo de contrato le aplica a las actividades de generación de energía eléctrica.
- ✓ La celebración de estos contratos genera la obligación de pagar una prima igual al 1% del valor de la inversión realizada cada año, pero si la inversión contempla un período improductivo el monto de la prima será del cero punto cinco 0.5% del valor de la inversión.

- ✓ **Decreto 2755 de 2003, “por medio del cual se reglamenta el artículo 207-2 del estatuto tributario”.**³¹
- ✓ Renta exenta por quince años para generadores eléctricos, siempre y cuando se tramite, obtenga y venda certificados de emisiones de dióxido de carbono, de acuerdo con los términos del protocolo de Kyoto y se reinvierta al menos el 50% de los recursos obtenidos por la venta en la parte social de la zona de impacto directo. Sin embargo este decreto no es específico con la energía geotérmica.

³¹ Estatuto Tributario Colombiano actualizado 2014.

- ✓ **Estatuto Tributario, Art. 424-5.4.**³²
 - ✓ Quedan excluidos del impuesto sobre las ventas los siguientes bienes: Los equipos y elementos nacionales o importados que se destinen a la construcción, instalación, montaje y operación de sistemas de control y monitoreo, necesarios para el cumplimiento de las disposiciones, regulaciones y estándares ambientales vigentes, para lo cual deberá acreditarse tal condición ante el Ministerio del Medio Ambiente. Los equipos para el control y monitoreo ambiental, incluidos aquellos para cumplir con los compromisos del Protocolo de Montreal.

- ✓ **Resolución número 486 del 7 de junio de 2002, “Por la cual se establece la forma y requisitos para presentar ante el Ministerio del Medio Ambiente las solicitudes de calificación de exclusión de impuesto a las ventas de que tratan los artículos 424- 5 numeral 4o y 428 literal f del Estatuto Tributario, así como el procedimiento interno para el trámite correspondiente”.**³³
 - ✓ Que mediante el artículo 424-5 numeral 4o del Estatuto Tributario se determinó que quedan excluidos del impuesto sobre la ventas los equipos y elementos nacionales o importados que se destinen a la construcción, instalación, montaje y operación de sistemas de control y monitoreo, necesarios para el cumplimiento de las disposiciones, regulaciones, y estándares ambientales vigentes, para lo cual deberá acreditarse tal condición ante el Ministerio del Medio Ambiente.³⁴
 - ✓ Que así mismo el artículo 428 literal f del Estatuto Tributario establece que no causa el impuesto sobre las ventas la importación de maquinaria o equipo, siempre y cuando dicha maquinaria o equipo no se produzca en el país, destinados a reciclar y procesar basuras o desperdicios (la maquinaria comprende lavado, separado, reciclado y extrusión), y los destinados a la depuración o tratamiento de aguas residuales, emisiones atmosféricas, o

³² Estatuto Tributario Colombiano actualizado 2014.

³³ Resolución número 486 del 7 de junio de 2002. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

³⁴ Estatuto Tributario Colombiano actualizado 2014.

residuos sólidos, para recuperación de los ríos o el saneamiento básico para lograr el mejoramiento del medio ambiente, siempre y cuando hagan parte de un Programa que se apruebe por el Ministerio del Medio Ambiente.

- ✓ **ley 1450 de junio 16 de 2011, la misma que contempla el plan de desarrollo 2011-2014, introduce una modificación en el artículo 158-1 del estatuto tributario, que mejora los beneficios para los contribuyentes que inviertan en investigación y desarrollo tecnológico.**³⁵
- ✓ Las personas que realicen inversiones en proyectos calificados como de investigación y desarrollo tecnológico, según los criterios y las condiciones definidas por el Consejo Nacional de Beneficios Tributarios en Ciencia, tecnología e Innovación tendrán derecho a deducir de su renta, el ciento setenta y cinco por ciento (175%) del valor invertido en dichos proyectos en el período gravable en que se realizó la inversión. Esta deducción no podrá exceder del cuarenta por ciento (40%) de la renta líquida, determinada antes de restar el valor de la inversión.
- ✓ Permite deducir en años siguientes lo que no pueda deducir en el año de inversión debido al límite del 40% de la renta líquida, es decir que el exceso de ese 40% se puede deducir en los años gravables siguientes.
- ✓ Aplica a proyectos de carácter científico, tecnológico o de innovación tecnológica reconocidos por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- ✓ **Ley 633 de 2000, Art. 158-1, Descuento tributario IVA para maquinaria pesada.**³⁶
- ✓ Cuando la maquinaria importada tenga un valor CIF superior a quinientos mil dólares (USD 500.000.00), el pago del IVA podrá realizarse de la siguiente manera: 40% con la declaración de importación y el saldo en dos (2) cuotas iguales dentro de los dos años siguientes.

³⁵ ley 1450 de junio 16 de 2011. Congreso de la república de Colombia.

³⁶ Ley 633 de 2000, congreso de la república de Colombia.

- ✓ El valor del impuesto sobre las ventas, podrá descontarse del impuesto sobre la renta, correspondiente al período gravable en el que se haya efectuado el pago y en los períodos siguientes.
- ✓ Aplica a las industrias básicas entre las cuales se encuentra la generación y transmisión de energía eléctrica.
- ✓ **Estatuto Tributario, Art. 258-2, Deducción por inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente.**³⁷
 - ✓ Deducción del 100% del valor de las inversiones que se realicen en control y mejoramiento del medio ambiente en el respectivo año gravable. No podrá ser superior al 20% de la renta líquida, determinada antes de restar el valor de la inversión. No podrán deducirse el valor de las inversiones realizadas por mandato de una autoridad ambiental para mitigar el impacto ambiental producido por la obra o actividad objeto de una licencia ambiental.
- ✓ **Estatuto Tributario, Art. 158-2. Deducción especial por adquisición de activos fijos reales productivos.**
 - ✓ Deducción del 40% del valor de las inversiones efectivas realizadas solo en activos fijos reales productivos adquiridos, aún bajo la modalidad de leasing financiero con opción irrevocable de compra.
 - ✓ Este beneficio no posee limitación con respecto a la renta líquida del contribuyente y podrá utilizarse en forma permanente.
 - ✓ Definición activo fijo real productivo: bienes tangibles que se adquieren para formar parte del patrimonio, participan de manera directa y permanente en la actividad productora de renta del contribuyente y se deprecian o amortizan fiscalmente.³⁸

³⁷ Estatuto Tributario Colombiano actualizado 2014.

³⁸ Estatuto Tributario Colombiano actualizado 2014.

- ✓ **Ley 685 de 2001 (Código de Minas), Art. 45 y Ley 1382 de 2010. Definición de contrato de concesión minera.**³⁹

- ✓ El contrato de concesión minera es el que se celebra entre el Estado y un particular para efectuar, por cuenta y riesgo de este, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse dentro de una zona determinada y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en este Código. Este contrato es distinto al de obra pública y al de concesión de servicio público. El contrato de concesión comprende dentro de su objeto las fases de exploración técnica, explotación económica, beneficio de los minerales por cuenta y riesgo del concesionario y el cierre o abandono de los trabajos y obras correspondientes.

³⁹ Ley 685 de 2001. Congreso de la república de Colombia. (Código de Minas).

2. DIFICULTADES COMPARTIDAS DE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA Y DE LOS HIDROCARBUROS EN COLOMBIA

Un desafío compartido no solo de estas industrias sino de todas las relacionadas con la energía, es garantizar la oferta económicamente sostenible y desarrollar una infraestructura moderna con la capacidad exigente de una demanda en crecimiento, acompañado de los retos ambientales que ello conlleva.

La industria petrolera y la geotérmica comparten gran parte de las actividades que se realizan, principalmente en el upstream, por lo tanto los problemas técnicos, de ingeniería y operacionales pueden desde varias perspectivas, ser compartidas y/o de interés común en la búsqueda de sus soluciones. Por ello es pertinente identificar los problemas principales que pueden compartir y con ello buscar la posible transferencia tecnológica entre estas industrias.

Uno de los obstáculos más grandes de la industria petrolera a lo largo de la historia en Colombia son los conflictos sociopolíticos debido principalmente a problemas ambientales, renta petrolera, comunidades y desarrollo de la industria, que podrían afectar la implementación de proyectos de energía geotérmica por tener su mismo carácter. Así mismo la ingeniería juega un papel fundamental en el manejo de este tipo de recursos ya sean geotérmicos o petroleros. A continuación se nombraran los problemas de ingeniería y tecnológicos que afectan a ambos sectores minero energéticos con una breve descripción de cada uno:

2.1. PERFORACIÓN Y COMPLETAMIENTO.

El proceso de perforación en la industria petrolera va en la misma dirección de la economía e incluso unos pequeños problemas que se encuentren en cualquier momento durante la perforación podría generar una pérdida comercial (es decir, en tiempo y dinero). La mayoría de los pozos petroleros de los campos colombianos son propensos a presentar inestabilidad de las paredes debido a la presencia de zonas tectónicamente activas, presencia de lutitas hinchables, malas prácticas en el proceso de perforación, formaciones sobre presionadas, formaciones fracturadas entre otros. Debido a la naturaleza de la

misma formación durante la actividad de perforación se pueden presentar pérdidas de circulación, pegadas diferenciales, patadas, derrumbamiento de las paredes así como pegadas mecánicas entre otros problemas los cuales en muchas ocasiones se relacionan a la indebida planificación y control de las variables antes y durante la actividad de perforación.

En la cuenca del Piedemonte Llanero es frecuente encontrar problemas geomecánicos complejos los cuales afectan la integridad del pozo y del posterior completamiento debido al excesivo esfuerzo principal horizontal el cual sobrepasa al esfuerzo principal vertical. Algunos ejemplos típicos de problemas de perforación relacionados con la geomecánica incluyen la inestabilidad del pozo y el fracturamiento de la formación. Como resultado de esos problemas se tienen; costos resultantes de la pérdida de circulación, los golpes de presión, el atascamiento de las tuberías, las sartas de revestimiento adicionales, las desviaciones forzadas de la trayectoria del pozo, e incluso el abandono del pozo.

Para mantener la estabilidad del pozo, los operadores deben desarrollar planes de perforación y construcción de pozos que contemplen la magnitud y dirección de los esfuerzos, el peso del lodo, la trayectoria y la presión de poro, durante y después de la perforación de un pozo. Los perforadores manejan las presiones ejercidas por el peso del lodo para evitar problemas de estabilidad de los pozos. El control de la hidráulica del pozo que realizan refleja la adopción de un enfoque de un problema geomecánico basado en la ingeniería petrolera. Durante la perforación, los pozos pueden verse comprometidos a través de una diversidad de modos de fallas inducidas por el lodo.

La perforación de pozos geotérmicos es una de las actividades más costosas en estos proyectos; los costos de los pozos representan el 35 al 50% del total de los costos del capital de un proyecto de este tipo.⁴⁰ La perforación de los pozos se hace en base a la tecnología de la industria del petróleo y del gas con modificaciones para alta temperatura y diámetros más grandes que los usados normalmente en el sector de los hidrocarburos. A continuación se nombran las tres razones principales por lo que es más costoso la perforación geotérmica:

- ✓ Retos técnicos: Técnicas y herramientas especiales son requeridas para las condiciones más duras de fondo de pozo.

⁴⁰ Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo. Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad 2013. Pag. 57

- ✓ Diámetros grandes: Económicamente, hay una necesidad para producir agua caliente o vapor a grandes caudales. Es así que un hueco y casing amplio es necesario. En muchos casos, el objetivo a una específica profundidad, el diseño de pozo requiere más sartas de revestimiento en un pozo geotérmico que uno de petróleo o gas.
- ✓ Unicidad: Los pozos geotérmicos, incluso en un mismo campo, son diferentes entre sí más que los de petróleo y gas en el mismo campo.
- ✓ Por la naturaleza del ambiente geológico en los que se encuentran los yacimientos geotérmicos económicamente viables y de poca profundidad (5000 pies) caracterizados por presentarse rocas calientes, presurizadas y extremadamente duras, la perforación geotérmica se enfrenta a muchos obstáculos. Algunos de estos son simplemente impedimentos físicos que hace el proceso bastante difícil.
- ✓ Las condiciones extremas de temperatura y presión a profundidades no tan subterráneas, limitan la implementación de materiales convencionales usados a las mismas profundidades en la industria petrolera en los componentes de la sarta de perforación así como en el revestimiento, revestimiento usado para aislar zonas de CO₂ para evitar las pérdidas de circulación de lodo en zonas con altas permeabilidades, estabilizar las paredes del pozo y sellar intrusiones de agua de baja temperatura al pozo. Esto genera costos elevados en tiempos iniciales de la perforación de cada pozo aumentando las inversiones de manera exponencial, por ello uno de los retos más difíciles a superar es llevar a cabo la perforación de pozos geotérmicos con su posterior completamiento al menor costo posible.

Es así que “problema” en perforación es un nombre genérico para muchos eventos no planeados durante la perforación que van desde los de menor riesgo tales como pequeñas pérdidas de fluido de circulación, a catastróficos como la pega del BHA (Bottom Hole Assembly) y la consecuente torcedura de la tubería (rotura). ⁴¹

El problema de perforación y completamiento más frecuente en los pozos geotérmicos es la pérdida de circulación del fluido de perforación debido a formaciones altamente fracturadas, permeables y falladas, características geológicas que son un común denominador de todos los sistemas hidrotermales convectivos donde se desarrollan la

⁴¹ Finger y Blankenship. Drilling problems (2010).

mayoría de campos geotérmicos. Lo contradictorio del asunto es que la alta permeabilidad es fundamental y es un componente requisito para cualquier sistema geotérmico.

Típicamente, la permeabilidad natural de las formaciones no se limita únicamente a la estructura del yacimiento geotérmico, pero sí a formaciones someras y supra yacentes que están caracterizadas por tener una alta permeabilidad. Este conjunto de características propias a yacimientos geotérmicos y sus formaciones adyacentes y adicionando la naturaleza de baja presión de la mayoría de los sistemas geotermales, traen como resultado las pérdidas de circulación del fluido de perforación parcial o total a una cierta etapa durante la perforación del pozo. De hecho, en últimas si no hay pérdidas de circulación en un sistema de baja presión, esto es una indicación que no hay alta permeabilidad y por lo tanto el pozo es un pozo seco.

La alta permeabilidad y por consiguiente el alto índice de fracturamiento encontrado en los yacimientos geotérmicos se debe principalmente a las tres siguientes razones:

- ✓ Formaciones de roca dura en regiones sísmicamente activas tienden a ser fracturadas.
- ✓ Gradientes geotérmicos anormales son debidos al flujo convectivo de las aguas subterráneas a través del sistema de fracturas.
- ✓ Caudales requeridos en pozos geotérmicos comercialmente activos provienen de flujos en fracturas. Es así que pozos geotérmicos óptimos a menudo intersectan sistemas de fracturas; y el mejor pozo podría ser uno en el que se encuentren severos problemas de circulación.⁴²

Por eso las pérdidas de circulación de los fluidos de perforación hacia las fracturas y poros de las formaciones rocosas que están siendo perforadas son el problema más costoso y frecuente en la perforación geotérmica. Este problema representa en promedio el 10% del total del costo de un pozo en un campo maduro geotérmico y a menudo representa más del 20% de los costos en pozos de exploración y producción. Estas pérdidas son perjudiciales por muchas razones y la tendencia a la pérdida de circulación se agrega por el desequilibrio de presión entre la columna densa relativamente fría del fluido de perforación y los fluidos calientes más livianos en la formación.

⁴² Finger y Blankenship. Drilling problems (2010).

El flujo del fluido de perforación con cortes hacia la formación puede dañar la permeabilidad y reducir la productividad del pozo. Además estas pérdidas de circulación durante la cementación del pozo pueden causar trabajos incompletos que pueden reflejarse en una mala adherencia del casing a la formación aumentando críticamente la posibilidad del que casing falle prematuramente debido a los ciclos térmicos durante la vida del pozo entre producción y cierre de este.

Las técnicas para solucionar este tipo de problema son generalmente diferentes a las implementadas a los pozos de hidrocarburos ya que las altas temperaturas de los pozos geotérmicos degradan de gravedad los materiales convencionales para las pérdidas de circulación. Como resultado, lo que es un problema menor para los pozos de hidrocarburos es un problema mayor en la perforación de pozos geotérmicos. Ha habido pozos geotérmicos con graves problemas de pérdidas de circulación en donde la perforación ha tenido que abandonarse.

Otro factor que afecta y acarrea problemas al proceso de perforación son las altas temperaturas en zonas productoras. Por supuesto que este es el objetivo, encontrar zonas de alta temperatura aun así se puede juzgar que gran parte de fallas en materiales, equipos, empaques, problemas de corrosión, tanto en la sarta de perforación como en las instalaciones superficiales, están necesariamente relacionadas a las temperaturas elevadas, y entre más elevadas estén éstas, los problemas serán mayores. De hecho, el riesgo más elevado surge al contactar acuíferos calientes, en donde las pérdidas de circulación casi siempre son totales, no se pueden recuperar corazones (muestras), es casi imposible obtener registros eléctricos, ya que los cables no siempre soportan las temperaturas del yacimiento, y peor aún es posible que en estas condiciones se presenten problemas graves de pesca.

Los problemas de pesca son comunes tanto en la perforación de pozos geotérmicos como petroleros, ya que durante la perforación puede suceder accidentes mecánicos que requieren la aplicación de técnicas de pesca en las cuales se suelen usar las herramientas y procedimientos habituales; sin embargo, en particular cuando el problema se presenta en la vecindad o enfrente de los estratos saturados con agua a alta temperatura, la situación se torna sumamente peligrosa ya que muchos elementos de pesca se vuelven casi inútiles por el daño que sufren los cables y las cabezas de los registros, que impiden la operación debida de cada herramienta y así se imposibilita organizar y llevar a cabo las operaciones básicas de pesca.

Otro problema que surge durante la operación de completamiento del pozo geotérmico así como petrolero son las pérdidas de circulación del propio cemento hacia las formaciones muy permeables y fracturadas. Las pérdidas se deben a la facilidad con la que las columnas de lechada fracturan las capas adyacentes al yacimiento geotérmico generalmente débiles, dada a la alta densidad del cemento sumado a la tendencia del lodo de perforación a la degradación o gelificación por las altas temperaturas que restringe la movilidad de la lechada y la columna de fluido de perforación, impidiendo drásticamente cumplir con los requerimientos técnicos, dejando así comprometida la capacidad mecánica de la sarta de revestimiento la cual se debe correr desde superficie hasta fondo de pozo.

Un inconveniente que agrava aún más el anterior problema de completamiento es la dilución de la lechada que contacta formaciones fracturadas que contienen fluidos hidrotermales de baja densidad lo cual disminuye la calidad del cemento para sellar estas zonas y mantener adherido el revestimiento a las paredes del pozo para evitar los esfuerzos térmicos ya mencionados.

En actividades de completamiento de pozos para métodos de recobro mejorado (con vapor), es frecuente que los zapatos, los coples flotadores y especiales, tapones etc., que son necesarios para realizar las cementaciones, sufran con gran frecuencia daños o alteraciones que finalmente impidan su operación para la que fueron diseñados debido a las altas temperaturas y presiones. Estos problemas en los campos de petróleo son específicos para proyectos de implementación de métodos térmicos pero en los campos geotérmicos son un común denominador durante la marcha de casi todo proyecto de perforación y posterior producción de un campo.

2.2. FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES.

En los campos de hidrocarburos la precipitación y acumulación de los minerales disueltos en el agua de formación es uno de los problemas de producción que preocupan en gran medida a los ingenieros de producción. Los depósitos se incrustan en los orificios de los cañoneos, las líneas de producción, las válvulas, las bombas y los equipamientos de completamiento del pozo, los cuales taponan los orificios e impiden el flujo normal de los fluidos. Cada vez que un pozo de hidrocarburos produce agua o se usa inyección de agua como método de recobro existe el riesgo de que se formen incrustaciones.

“Las incrustaciones producen muchas dificultades, aumentando los costos en la producción, cambiando variables como la presión y dificultando el tránsito normal de los fluidos por todas las facilidades de producción. Algunos problemas específicos se presentarán a continuación.

- ✓ Problemas de corrosión por picadura causados por la depositación irregular sobre las superficies metálicas debido a que se crean zonas anódicas y zonas catódicas.
- ✓ Incrementos desmesurados de la presión de los sistemas que pueden causar rupturas y fugas en los empaques, líneas de flujo y tubing, ocasionando fugas que pueden ocasionar daños al medio ambiente.
- ✓ Taponamiento en la cara de la formación.
- ✓ Interferencias en la recuperación primaria y terciaria.
- ✓ Creación de la necesidad del uso de tratamientos costosos y frecuentes de estimulación de pozos (trabajos de acidificación).
- ✓ Restricción de flujo a través de las tuberías (taponamiento del tubing y líneas de superficie).
- ✓ Cambios totales o parciales de líneas y accesorios.
- ✓ Necesidad de perforar nuevos pozos inyectoros y productores.”⁴³

Por otra parte la mayoría de plantas geotérmicas, el agua caliente llega a ser súper saturada con grandes cantidades de sales creadoras de escamas. Debido a la composición química de los fluidos geotérmicos, éstos son corrosivos e incrustantes, y ello se debe a las formaciones geológicas con las que los fluidos interactúan en su camino hacia el pozo, donde existen dos parámetros dominantes; el contenido de sales y el calor. Por ello es llamado sistema termo-haluro. Estos parámetros influyen fuertemente la corrosión y la incrustación cuando reaccionan con los equipos en superficie e instalaciones.

⁴³ Castro, H. Gamez, C. Evaluación de la depositación de incrustaciones en sistemas de bombeo electrosumergible del campo Cantagallo (2009).

La incrustación es un problema común en aguas geotérmicas altamente concentradas, especialmente en salmueras calientes que se forman en los equipos de superficie, combinadas con gruesas capas de productos de corrosión o depósitos minerales insolubles en agua. A medida que la temperatura del fluido disminuye en su trayecto por los sistemas de distribución la incrustación se convierte en un problema más serio. La incrustación depende de las características fisicoquímicas de los fluidos geotérmicos y la composición de la salmuera: temperatura, salinidad, pH, densidad, gases disueltos, saturación, cinética y termodinámica del proceso de precipitación, y régimen de flujo.

La precipitación de iones que reduce la eficiencia de las turbinas y los intercambiadores de calor es uno de los mayores problemas que afectan el recobro de energía desde los sistemas geotérmicos de agua caliente o vapor. Los tipos de escamas comúnmente encontrados incluyen carbonato de calcio, sílice amorfa y silicatos, óxidos metálicos mixtos y sulfuros.

En contacto con los equipos superficiales y en particular las superficies metálicas, estos sedimentos influyen el comportamiento de la corrosión debido a la formación de depósitos amorfos o cristalinos que promueven una corrosión localizada debajo de éstos. La deposición del carbonato de calcio se puede dar rápidamente cuando se alcanza alta súper saturación como resultado de la remoción del CO_2 en el cual más CaCO_3 se incrusta en la superficie de la tubería interior generando taponamientos que obturan los flujos del fluido geotérmico. El carbonato de calcio es encontrado en sistemas geotérmicos de baja, media y alta entalpía. Aunque la velocidad de formación de escamas depende del grado de la súper saturación del agua o vapor que proviene de los pozos de producción existen casos en donde el agua está súper saturada a tal punto de obstruir completamente el flujo del pozo en unas cuantas semanas.

Las incrustaciones de sílice son encontradas en casi todos los campos geotérmicos de alta entalpía en donde el agua predomina estas incrustaciones son muy tenaces, densas y difíciles de remover de las superficies calientes por lo que son típicamente inertes a la mayoría de los químicos y una vez formados son bastantes resistentes a la remoción mecánica. La deposición de sílice toma lugar principalmente sobre la superficie de los equipos y en los pozos de inyección.

En muchos sistemas geotérmicos, la deposición de sulfuro y óxido de metal ocurre frecuentemente. El hierro presente en la salmuera de la corriente de producción ya sea de

origen natural desde el yacimiento o el producto de la corrosión, reacciona muy rápido con el sulfuro que abunda en el agua geotérmica para producir escamas de sulfuro de hierro en los pozos de producción e inyección. En algunos casos, cambiando el pH de la salmuera se ha controlado la velocidad de precipitación de la mezcla de sulfuro/óxido de hierro.⁴⁴

2.3. CORROSIÓN.

Los materiales metálicos usados en una planta geotérmica como las facilidades de un campo petrolero pueden estar sometidos a corrosión debido a la agresividad corrosiva del fluido de producción. Los principales agentes corrosivos en Colombia de los fluidos son los gases disueltos sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3) e iones de cloruro (Cl^-).

La ocurrencia de la corrosión en la producción de un campo petrolero es un proceso continuo que nunca termina. Muchos de los campos son designados no corrosivos al comienzo de su vida productiva pero con el paso del tiempo los problemas de operación y fallas debido a la corrosión aumentan y se hacen necesarias medidas de control de corrosión.

Algunos de los factores que pueden originar cambios en las tasa de corrosión son: incremento de la producción de agua, incremento del contenido de gas ácido (H_2S), actividad bacteriana, operaciones de recuperación secundaria y variaciones en la presión. La corrosión puede ocurrir en cualquier parte del sistema de producción en un campo petrolero, desde el fondo de pozo hasta los equipos utilizados en el proceso para la venta de petróleo y gas.

Los factores dominantes para la corrosión son la temperatura, presión, la salinidad, concentración de los gases antes mencionados, caudal, régimen de flujo, características del líquido como el pH y la concentración de oxígeno disuelto. Los iones cloruro pueden afectar la capa de óxido penetrando las películas pasivas, iniciando picaduras y hendiduras en sitios localizados. El ataque localizado es resultado de las diferencias en

⁴⁴ Modificado de: IGA Service GMBH. Geothermal exploration best practices: a guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects (2013).

aeración, concentración, temperatura, velocidad y pH, y ocurre como picaduras, hendiduras, grietas, cortes y partes erosionadas.

En la tabla 3 se nombran cada uno de los tipos de corrosión encontrados en los materiales metálicos de un campo geotérmico y petrolero junto con una breve descripción.

Tabla 3. Tipos de corrosión en campos petroleros y geotérmicos.

CORROSION UNIFORME	Ocurre por reacción química o electroquímica que actúa uniformemente sobre toda la superficie del metal. El espesor del material se va reduciendo paulatinamente, ya sea porque el óxido es adherente, o porque el medio disuelve ese óxido. En los sistemas geotérmicos es debido por los iones de cloruro, amoníaco e hidrógeno.
PITING	Ataque corrosivo localizado que produce pequeños agujeros, su propagación trae consigo disolución del metal, mientras se mantiene un alto grado de acidez en el fondo del agujero. Requiere un periodo de iniciación, pero luego los agujeros crecen a gran velocidad. Empieza donde se produce un aumento de las velocidades de corrosión especialmente en inclusiones, heterogeneidades estructurales y de composición en donde las picaduras rompen la capa pasiva del metal. Estos pequeños agujeros se desarrollan y crecen en la dirección de la gravedad y sobre las superficies más bajas de los equipos. Pueden ocasionar fallos inesperados.
CORROSION EN GRIETAS	Forma de corrosión electroquímicamente localizada que puede presentarse en hendiduras y bajo superficies protegidas, donde pueden existir soluciones estancadas. Esta se presenta por una diferencia en la concentración de oxígeno, en donde la reacción anódica se da en la región de menor concentración.
FISURAMIENTO POR CORROSION BAJO ESFUERZOS (SCC)	Es causado por los efectos simultáneos de los esfuerzos y un medio corrosivo determinado, en especial por la presencia de iones libres de cloruro. Los esfuerzos pueden ser debido a las cargas aplicadas, a tensiones residuales del proceso de fabricación o una combinación de ambos. Al formarse grietas en la superficie del metal estas se catalizan por la presencia de esfuerzos mecánicos. La presencia de oxígeno y el incremento de la temperatura aumentan la velocidad de corrosión.
FISURAMIENTO POR CORROSION DE AZUFRE BAJO ESFUERZOS (SSC)	Este tipo de corrosión ocurre en los aceros de alta resistencia en presencia de medios de alto contenido de hidrógeno de azufre (H ₂ S). El SSC es diferente al SCC debido a que las velocidades de corrosión disminuyen con la presencia del oxígeno y la disminución de la temperatura, sin embargo, los bajos valores de pH aumentan la velocidad de corrosión.
FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO	Burbujas de hidrógeno pueden formarse dentro del acero como consecuencia de la reacción de reducción en un cátodo del metal. Esto ocurre en metales de baja resistencia en presencia de soluciones que contienen H ₂ S. Estas ampollas o burbujas debilitan al acero y genera inminentes fracturas que se producen por el insuficiente movimiento del hidrógeno atrapado.

CORROSION INTERGRANULAR	Es una corrosión regional que se da alrededor de los límites de grano o en los granos vecinos de las aleaciones; sin embargo esto no afecta los granos. Este ataque genera fracturas de aleación o pérdida de resistencia. Los tratamientos térmicos causan este tipo de corrosión.
CORROSION GALVANICA	Proceso electroquímico que se presenta cuando la conducción eléctrica de dos diferentes metales se lleva a cabo en presencia de un electrolito, medio que hace posible la migración de los iones metálicos desde el ánodo (metal de menor potencial de reducción) al cátodo más rápidamente que de otro modo. La resistencia a este tipo de corrosión por parte de los metales se ve drásticamente afectada por los sistemas químicos y el cambio de temperatura.
CORROSION-FATIGA	La corrosión-fatiga ocurre por la fluctuación de esfuerzos en un ambiente corrosivo, es decir, que el metal se encuentra sometido a esfuerzos repetitivos. Ningún metal es inmune a una reducción de su resistencia a los esfuerzos cíclicos en un ambiente corrosivo. El daño de fatiga-corrosión es mayor que la suma de los daños causados por los esfuerzos cíclicos y la corrosión. Es por esto que los efectos combinados de la fluctuación, el esfuerzo y en si el ataque electroquímico del medio (corrosión) impactan la resistencia e integridad del material mucho más que otros simples efectos.
EROSION-CORROSION	Esto es la abrasión del material metálico por las altas velocidades del fluido que llevan materiales solidos o partículas. La capa pasiva del metal es removida por el ataque abrasivo del articulado en el fluido, el cual por las altas velocidades de flujo evita la formación de productos de corrosión en la superficie del material exponiéndolo cada vez más al ambiente corrosivo. A lo largo de la dirección de flujo, se crean agujeros (picaduras) y círculos en forma de ondas. Es frecuente este tipo de daños en las aletas de la turbina y en los campos geotérmicos donde se tienen flujo de dos tipos.

Modificado de: IGA SERVICE GMBH. Geothermal exploration best practices: a guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects (2013).

2.4. PROBLEMAS GEOMECÁNICOS.

En los campos petroleros del Piedemonte Llanero colombiano se presentan formaciones complejas que desafían todo tipo de conocimientos de los más expertos a nivel mundial. Problemas de inestabilidad de pozos, desprendimiento de cavings, presiones anormales y un sinnúmero de inconvenientes asociados a la perforación y funcionamiento de los pozos productores hacen de estos campos un reto tecnológico e investigativo único en el mundo.

En los problemas de inyección de agua y recobro mejorado de los campos maduros de hidrocarburos en el país generan cambios regionales geomecánicos debido a la alteración de los esfuerzos principales de las formaciones provocando inestabilidad en los pozos tanto inyectores como productores así también la disminución de la producción debido a la alteración de la porosidad y otros parámetros de flujos dentro del yacimiento, esto es

gracias al poco estudio que se realiza para entender un yacimiento desde el punto de vista geomecánico.

La mayoría de los yacimientos geotérmicos comerciales son de tipo hidrotermal, es decir, un yacimiento el cual se encuentra estructurado por una formación porosa que contiene agua o vapor a altas temperaturas, selladas por una falla o una capa sello, generalmente formaciones arcillosas. Estos tipos de sistemas geotérmicos cuentan con suficiente permeabilidad y fluidos de yacimiento representado en grandes cantidades de agua caliente o vapor que son extraídos a través de los poros y/o fracturas hacia los pozos productores.

Aun así estos sistemas hidrotermales constituyen una pequeña fracción de la totalidad de los recursos térmicos del subsuelo del planeta, en donde predominan yacimientos geotérmicos de rocas volcánicas calientes secas que se caracterizan por tener permeabilidades (alrededor de 44 mD o menos) y/o agua deficientes para su explotación directa. La producción de energía desde estos yacimientos secos y de baja permeabilidad puede ser lograda por medio de la ingeniería de redes de fracturas que consisten en la creación de fracturas artificiales y el mejoramiento de las ya existentes con el propósito de inyectarles agua fría desde superficie a través de un pozo inyector con el fin de aprovechar el intercambio directo calor roca-fluido y luego producir este mismo fluido caliente por medio de un pozo productor. A esta operación se le conoce como mejoramiento o ingeniería de sistemas geotérmicos (EGS).

Esta operación de producción e inyección de agua fría puede alterar el estado de la presión y la temperatura en los yacimientos geotérmicos. Consecuentemente, esta combinación de efectos causa la deformación y la falla de la roca, creando actividad sísmica en el subsuelo. Estas deformaciones cambian las propiedades hidráulicas, como lo son la porosidad y permeabilidad, que afectan el flujo de fluidos y la transferencia de calor.

Es así que los esfuerzos locales en los yacimientos, habiendo alcanzado un estado de equilibrio a lo largo del tiempo geológico, no son solamente alterados por el proceso de EGS sino también por los procesos de perforación, ello dificulta la predicción de los procesos de deformación en los poros y fracturas multiescalas de la roca y su acoplamiento a los procesos térmicos e hidrológicos, procesos que son importantes en el mejoramiento de los sistemas geotérmicos.

Si los cambios de los esfuerzos y deformaciones inducidos por las operaciones de perforación o producción no se anticipan, los desafíos y costos que implica el manejo de un área prospectiva pueden exceder de manera significativa las expectativas iniciales de un operador.

2.5. IMPACTOS AMBIENTALES Y LICENCIAMIENTO AMBIENTAL.

El desarrollo de las actividades y operaciones propias de la Industria, implican una gran interacción con el medio ambiente, así mismo, con las comunidades en donde se lleva a cabo estos proyectos, todas las actividades involucradas en el upstream del negocio generan efectos sobre los ecosistemas, el medio, y las poblaciones circunvecinas, estos efectos pueden ser más o menos adversos, en la medida que se tomen y respeten las pautas necesarias para no generar un desequilibrio o un daño al entorno natural y social.

Según la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) ⁴⁵ el licenciamiento ambiental es un proceso utilizado para la planeación y administración de proyectos que asegura que las actividades humanas y económicas se ajusten a las restricciones ecológicas y de recursos. De esta forma se constituye en un mecanismo clave para promover el desarrollo sostenible.

De acuerdo al Art. 3 del Decreto 2820, la Licencia Ambiental, es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual sujeta al beneficiario de ésta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada.⁴⁶

⁴⁵ Wilman y Ardila B. Impactos de la Industria Petrolera en el Medio Ambiente – Upstream, Universidad Industrial de Santander, (2014).

⁴⁶ Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Servicios de información al ciudadano, Notificaciones Judiciales, (2014).

A continuación se nombran algunos lineamientos:

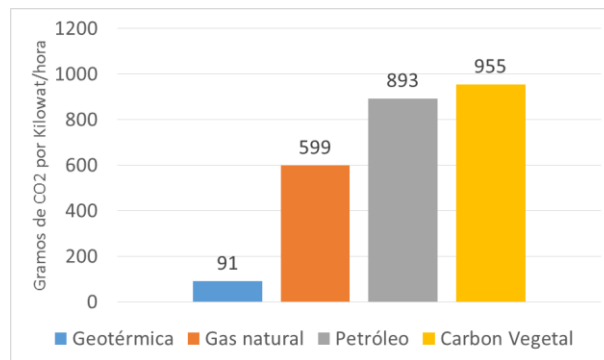
- ✓ La licencia ambiental llevará implícitos todos los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, que sean necesarios por el tiempo de vida útil del proyecto, obra o actividad.
- ✓ El uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, deberán ser claramente identificados en el respectivo Estudio de Impacto Ambiental.
- ✓ La licencia ambiental deberá obtenerse previamente a la iniciación del proyecto, obra o actividad. Ningún proyecto, obra o actividad requerirá más de una licencia ambiental.
- ✓ La licencia ambiental se otorgará por la vida útil del proyecto, obra o actividad y cobijará las fases de construcción, montaje, operación, mantenimiento, desmantelamiento, restauración final, abandono y/o terminación.

La energía Geotérmica se considera como energía renovable no convencional, es considerada limpia en relación a la energía que tiene como materia prima fuentes fósiles como lo son el petróleo y el carbón; el hecho de considerarse una energía limpia no la convierte en totalmente amigable ambientalmente, debido a procedimientos irresponsables a la hora de perforar pozos, inyectar o reinyectar fluidos, desarrollar el campo (establecer líneas y abrir carreteras) o dar tratamiento a los minerales pesados resultado de la extracción de energía, esto puede conllevar a que ponga en peligro los mantos acuíferos superficiales, de los que generalmente se abastecen las poblaciones urbana y rurales, la fertilidad de los suelos y lo que es aún más importante la salud de las personas.

2.5.1. Emisiones de gases efecto invernadero. Cuando una central geotérmica es de tipo cerrado con fugas, como es el caso de las plantas de vapor seco y de separación flash. El vapor generado por la torre de enfriamiento proviene directamente del yacimiento geotérmico, por lo tanto la emisión de CO₂ (Dióxido de carbono) que es la causante principal de los gases de efecto invernadero, está relacionado con la concentración de este en la composición del vapor, y no de ningún proceso que se realice en el pozo o campo, ni de ninguna combustión donde intervenga algún tipo de combustible fósil.

Por esta razón, si se comparan las emisiones con centrales eléctricas de combustible fósil, podrían llegar fácilmente a un 0.1%, si se utilizan sistemas de reinyección que controlen las emisiones.⁴⁷ En la figura 6 se muestra las emisiones de CO₂ por fuente de energía primaria, donde se constata que efectivamente la energía geotérmica se encuentra en el nivel más bajo de emisiones.

Figura 6. Emisiones de CO₂ por fuente de energía primaria en EEUU.



Modificado de: Fridleifsson et al. 2008.

Emisiones de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y mala calidad del aire.

Generalmente el sulfuro de hidrógeno, hace parte de la composición, del petróleo crudo, gas natural, gases volcánicos, manantiales termales y en la producción geotérmica. Este gas es un verdadero dolor de cabeza desde cualquier punto de vista ingenieril; es tóxico y letal, es corrosivo casi con cualquier metal e inflamable. Con un agravante, posee una densidad más alta que la del aire y por lo tanto en un escape, quedara cerca del pozo (partes bajas) y su disolución con el ambiente tardara un tiempo considerable, dependiendo de la cantidad emitida por la fuga, sin embargo la característica importante de tener un olor a huevo podrido, hace que su detección se realice de manera rápida, pudiendo con ello evitar pérdida de vidas humanas al actuar de manera rápida y pertinente.

Es evidente que las plantas de energía geotérmica principalmente de alta temperaturas, que usan el vapor de las entrañas de la tierra para alimentar la turbina, contaminan el aire

⁴⁷ Alyssa Kagel. Et al. GEA. A Guide to Geothermal Energy and the Environment (2007).

circundante a la planta con olores desagradables y que pueden causar daño irreversible a la comunidad, el ambiente y los recursos naturales.

2.5.2. Vertimiento de residuos geotérmicos y petroleros producidos y su influencia en el agua potable y suelos. Además de CO₂ y H₂S el vapor de agua a alta temperatura producto de la explotación geotérmica, contiene cantidades significativas de sustancia químicas como el Arsénico, Cloruros, Boro, Nitratos, Litio, Níquel, Plomo, Mercurio, Cromo y Sulfatos, y de la industria petrolera; sales, trazas de hidrocarburo y químicos de inyección que de no tratarse podría cambiar el PH natural de las aguas donde es vertido, ya sean superficiales o profundas y alterar con ello el equilibrio químico, dañando los yacimientos en profundidad o contaminando las aguas para el consumo humano, animal y el riego.

2.5.3. Competencia por el agua para consumo humano y/o alimentario. Cuando los yacimientos geotérmicos encontrados, son de roca caliente seca o se han depletado debido a la producción acelerada; por lo general se realizan inyecciones de agua para restablecen el reservorio. Así mismo ocurre con los métodos de recobro secundario usados en la industria petrolera. El problema radica en que se concesiona una gran cantidad de agua de algún afluente cercano o de un acuífero superficial que tenga la capacidad de cargarlo nuevamente, para así volver a restablecer la producción.

Según el país donde se realice el proyecto, las normativas ambientales son diferentes, por lo tanto, existen desde los países que dejan concesionar todos los recursos, sin ninguna restricción, hasta los países que no permiten la captación de aguas potables de acuíferos superficiales o manantiales naturales. Cabe anotar que además del consumo industrial existe un consumo adicional que generan los asentamientos de la industria y sus habitantes.

2.5.4. Impactos de la exploración sísmica con explosivos. La actividad sísmica con explosivos genera impactos negativos en el medio natural, pues interviene directamente sobre éste, ya sea porque se están preparando las condiciones para su ejecución (construcción de vías, trochas, helipuertos, locaciones, etcétera) o porque se está realizando (perforación, explosiones, vertimientos, etcétera). Los impactos varían de acuerdo a las condiciones ambientales y sociales de los territorios, pueden provocar

impactos como la deforestación, la pérdida de nacedores de aguas, el ruido, la contaminación de las aguas y del aire, la desestabilización de los suelos y, por ende, podría afectar la salud de todos los seres vivos.⁴⁸

Además de los impactos propios de la actividad de exploración sísmica en la tabla 4 se enumeran y describen otros impactos relacionados con la prospección sísmica.⁴⁹

Tabla 4. Impactos Ambientales de prospección sísmica

Impactos Ambientales según actividad de prospección sísmica	
ACTIVIDADES	IMPACTOS
APERTURA DE TROCHA Y TOPOGRAFÍA	Afectación de la vegetación, de magnitud variable en función de la cobertura vegetal encontrada a lo largo de la línea
	Creación de nuevas vías de acceso que crean mayores riesgos de depredación de los recursos naturales
	Generación de residuos sólidos, imposición de servidumbres; una forma de expropiación
	Crecimiento poblacional debido a las expectativas que la industria genera a las comunidades locales
	Captación de Aguas y manejo de residuos de los campamentos, en algunas zonas pueden alcanzar las 200 personas
	Desplazamiento de especies animales por el ruido
PERFORACIÓN	Procesos erosivos cuando se perfora sobre terrenos inestables o de alta pendiente, o por huecos de ensayo o inconclusos sin taponar
	Contaminación del agua por deficiente manejo de residuos de perforación
	Eventual contaminación del suelo por químicos utilizados.
	Generación de ruido con desplazamiento temporal de fauna
	Afectación de acuíferos y canales agua subterránea
	En zonas de pendiente, dependiendo de su estructura geológica puede generar deslizamientos
CARGA Y TAPADA POZOS	En zonas de pendiente, dependiendo de su estructura geológica puede generar deslizamientos
	Residuos sólidos en las zonas de carga
TENDIDO CABLE	No presenta efectos negativos de importancia
COLOCACIÓN DE GEÓFONOS	Activación de procesos erosivos por falta de restauración donde se sembraron geófonos profundos
DETONACIÓN Y REGISTRO	Compactación del suelo cuando se usan camiones vibradores
	Generación o dinamización de procesos erosivos cuando la operación se realiza en terrenos susceptibles o inestables

⁴⁸ Impactos Asociados A La Prospección Sísmica, PLUSPETROL. (2012).

⁴⁹ Wilman Y Ardila B, Impactos de la Industria Petrolera en el Medio Ambiente – Upstream, Universidad Industrial de Santander, 2014.

	Generación de ruido y movimiento de suelo "soplado", cuando los pozos quedan mal tapados
	Desplazamiento temporal o definitivo de fauna por detonaciones y ruido
	Afectación de acuíferos y canales de agua subterránea
	Explosivos sin detonar, afectando posteriormente a la población o a la fauna del lugar

Modificada de: Wilman y Ardila B, Impactos de la Industria Petrolera en el Medio Ambiente – Upstream, Universidad Industrial de Santander, 2014.

2.5.5. Demora en el licenciamiento ambiental. El proceso de licenciamiento ambiental no ha sido ajeno a todo tipo de observaciones y críticas sobre su eficiencia, su efectividad y su impacto, recientemente, ha sido señalado por diversos sectores productivos del país como un obstáculo al desarrollo económico y social del mismo, en especial, en términos de los retrasos que supuestamente genera al desarrollo de los sectores o “locomotoras” establecidos por el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: Prosperidad para Todos.⁵⁰

Los puntos de vista están despartados con la modificación del decreto 2820 de 2010 llamado “licencias exprés” y se supone que está tenga un equilibrio entre la demora en el licenciamiento ambiental y los impactos que pueda generar el rápido licenciamiento; sin embargo según el senador Jorge Robledo advierte que: “las licencias ambientales no existen en Colombia y en el mundo para estorbarles a las empresas que hacen las cosas bien, sino para protegernos de las que lo hacen mal, por incapacidad o por mala fe, atentando contra los intereses de la sociedad”.⁵¹

En resumen este problema de licenciamiento ambiental está bien desglosado en la evaluación de operaciones al proceso de licenciamiento ambiental en sus etapas de planeación, evaluación y seguimiento, desarrollados por las entidades encargadas del sector, los peticionarios y las autoridades ambientales realizada por la Unión Temporal S.E.I. SA – Fundación Natura de Colombia contratada por el Departamento Nacional de Planeación, concluyendo una serie de falencias durante todo el proceso (planeación, evaluación y seguimiento).

A continuación se mencionaran las principales problemáticas encontradas:

⁵⁰ Departamento Nacional de Planeación. Informe final ard-426-doc. (2013).

⁵¹ Senador Jorge Robledo.2013.

En la planeación (que comprende todas las actividades previas a la presentación de una solicitud de licencia ambiental, que deberían tener los proyectos, incluyendo 1) la concepción y planeación interinstitucional para definir zonas de intervención viables, y 2) la gestión y planeación de los peticionarios en el proceso de elaboración del EIA):

- Los dueños de los proyectos solo ven las licencias ambientales como un requisito para la ejecución de los mismos y no como una política propia de las compañías en aras de un beneficio socio-ambiental.
- Esta etapa no está regulada y por lo tanto la implementación es general; por lo tanto con ello se estandarizarían ciertas zonas donde de entrada pueda saberse con base a información colectada estadísticamente y las lecciones aprendidas de otros proyectos que puede y que no puede hacerse en cada una de las regiones.
- El sistema de información ambiental de Colombia (SIAC), que es el sistema de información para los usuarios y la autoridad ambiental está obsoleto, escaso y no funciona de manera adecuada, además a eso debería existir, la implementación de Evaluaciones Ambientales Estratégicas (EAE) sectoriales, e incluso regionales,
- Desarticulación entre instituciones del estado e incluso la empresa privada.
- La socialización y la consulta previa no pueden ser enfrentados como meros trámites administrativos sino como expresiones de derechos fundamentales; la participación de la población en el marco del proceso para el licenciamiento ambiental es importante y es necesario mantenerla, sin desconocer la necesidad de perfeccionar los instrumentos y procedimientos que se aplican por cuanto éstos están incidiendo en los plazos para la obtención de una licencia ambiental.

En la evaluación (que corresponde a la fase en la cual la autoridad ambiental competente analiza y evalúa el EIA presentado por el peticionario, se conjuga con la obtención de otros conceptos técnico pertinentes, la entrega de información adicional referente al EIA, y culmina con la emisión de la resolución de otorgamiento, o no, de la licencia ambiental del proyecto, obra o actividad):

- Una de las debilidades identificadas por los peticionarios en las autoridades ambientales es la falta de suficiente personal idóneo y capacitado para atender los sectores económicos estratégicos y Las carencias en cuanto a oferta académica (concentrada en Bogotá, D.C., Medellín, Bucaramanga y Cali), idoneidad

profesional y disponibilidad de recursos presupuestales para contratar y consolidar las plantas de personal de las autoridades ambientales y demás instituciones estatales involucradas en el proceso de licenciamiento ambiental.

- La directriz consagrada en el artículo 48 del Decreto 2820, referente a información ambiental para la toma de decisiones, no se está cumpliendo, ya que el IDEAM debería tener disponible la información ambiental para la toma de decisiones, con base en la generada a partir de los estudios ambientales, las actividades de evaluación y el seguimiento a los proyectos que hacen parte del proceso de licenciamiento ambiental.
- La normativa está presentada de una manera dispersa, no se encuentra sistematizada en un solo cuerpo normativo, y buena parte de las disposiciones que regulan el proceso, remiten a otras disposiciones de un alto grado de especialidad sobre temas o proyectos puntuales sujetos a licencia ambiental, haciendo del ejercicio interpretativo un proceso dispendioso para los usuarios, dando lugar a la discrecionalidad en la aplicación de la regulación.
- En la actualidad, el procedimiento de licenciamiento en la ANLA y las CAR no es homogéneo. Así, hay diferencias en la competencia definida por tipo de proyectos y entre las mismas CARs.
- Probablemente la actual operación del proceso induce a que se perciba cierta diferenciación: primero, por la misma organización interna de la ANLA al tener grupos de trabajo divididos por especialidades sectoriales; y segundo, el hecho que los términos de referencia se emiten diferenciados por cada sector.
- En la evaluación de impacto ambiental no existe un claro análisis territorial que permita no sólo identificar los impactos acumulativos, sino además articular adecuadamente la licencia con los procesos de ordenamiento territorial. Por ello se concluye que el proceso de evaluación ha dejado en evidencia la desarticulada concertación de asuntos ambientales respecto a la formulación de determinantes ambientales en los POTs y la formulación de los planes de desarrollo locales.
- La calidad de los EIA hace que estos se atrasen ya que debe de corregirse para continuar su proceso.

En el seguimiento (que Corresponde al control y seguimiento por parte de la autoridad ambiental, a los proyectos sujetos a licencia ambiental o plan de manejo ambiental, para la verificación de la eficiencia y eficacia de las medidas de manejo implementadas para afrontar los impactos previstos y no previstos ocasionados por el proyecto, obra o actividad licenciada):

- La etapa de seguimiento es considerada por todos los actores del proceso, como la más importante del licenciamiento ambiental, pero es la etapa que presenta mayores debilidades. El seguimiento se convierte en eje fundamental de la ejecución de los planes de manejo ambiental (PMA), porque es el momento real en que se producen los impactos, tanto los previstos como los imprevistos en el EIA y en el cual se verifica la efectividad de las medidas aprobadas por la ANLA para atender los impactos; además, en ella se debería estimar la magnitud de los impactos acumulativos, y medir la calidad de la gestión ambiental tanto del sector público como del sector privado así como todas las reestructuraciones que deban ser implementadas con el fin de minimizar los impactos.

En resumen las licencias ambientales en cualquiera de los sectores industriales del país, debería por un lado ser lo suficientemente estricta como para que no se generen impactos ambientales, socioculturales y a las comunidades y por otro ser versátiles sin que ello signifique la permisibilidad de daño ambiental sino más bien el cumplimiento de los tiempos estipulados, con el personal idóneo que retroalimente constantemente el sistema y se lleve un estricto control en la ejecución de los proyectos.

2.6. ADMINISTRACIÓN DEL RECURSO Y EFICIENCIA DE LOS PROCESOS.

Es normal pensar que las industrias generadoras de energía consuman parte de esta para llevar a cabo sus objetivos misionales, esta energía puede ser suministrada para diferentes partes del proceso; como para el tratamiento de aguas y sustancias químicas, para su mismo transporte y levantamiento desde las profundidades de la tierra.

Es sin duda que la eficiencia energética llevada a cabo en cada uno de los procesos, no solo beneficia económicamente a las empresas, sino que las hace mucho más amigables con el ambiente. Por esta razón es preciso estudiar los problemas asociados para interpretarlos y tratar de darles una solución que beneficie a las generaciones presentes y futuras.

2.6.1. Aguas asociadas a la producción de petróleo. Uno de los problemas históricos de la industria de los hidrocarburos y en especial de los crudos pesados; el crudo que proviene de las profundidades de la tierra viene asociada al agua, en el caso de Colombia numerosos campos petroleros localizados principalmente en la cuenca de los Llanos Orientales tienden a tener cortes de agua elevados del 95 al 98% a unas temperaturas que oscilan entre 77 a 110 °C. Cuando un campo maduro alcanza cortes de agua de este tipo, los pozos petroleros en muchas ocasiones ya no son viables económicamente para su explotación, dejando grandes cantidades de petróleo en su área de drenaje sin recuperar.

Además este corte de agua en la producción de petróleo se convierte en un verdadero dolor de cabeza para la industria, billones de dólares se han gastado en su tratamiento y vertimiento llevándola a los requerimientos ambientales establecidos (0.5% de BSW para Colombia).

Un gran porcentaje de agua asociada a la producción de petróleo, cuya característica principal es que su temperatura se encuentra cercana o superior a los cien grados Celsius se vierte en acuíferos superficiales o en el sistema hídrico nacional, pero poder llevar a cabo este vertimiento se deben cumplir con ciertos parámetros como lo son: trazas de hidrocarburo, minerales, químicos y temperatura para no descontrolar el equilibrio natural de las aguas lo cual se logra con costosos tratamientos que elevan considerablemente los gastos que no generan en si algún tipo de beneficio económico para la compañía operadora.

2.6.2. Crudos pesados. Colombia no es un país considerado petrolero debido a sus reservas, sin embargo la gran mayoría del crudo que produce es pesado. El factor de recobro para un crudo pesado y extra pesado está entre el 10-30%. Para poder aprovechar mejor los yacimientos hay que recurrir a técnicas de recobro mejorado, las cuales requieren una gran cantidad de energía ya sea para inyectar o calentar los fluidos dentro del yacimiento.

La energía requerida para los procesos EOR (inyección de vapor, combustión in situ y principalmente los relacionados con adición de energía calórica al yacimiento, para transmitirla con ello al crudo pesado, reducir su viscosidad y facilitar su transporte) son verdaderas fortunas que castigan los proyectos, necesitando de un precio razonable para su rentabilidad.

Además de la energía que se necesita suministrar a yacimientos de crudos pesados para mejorar el factor de recobro, se tienen otros problemas implícitos como son la formación de emulsiones, precipitación de parafinas y problemas de movilidad por su alta viscosidad entre otros inconvenientes que hacen aumentar los costos de tratamiento y transporte del mismo.

2.6.3. Transporte asociado al consumo de hidrocarburos y eficiencia global de los procesos. La canasta de productos ofrecidos desde la industria de los hidrocarburos al transporte es muy variada; la gasolina que se usa en automóviles y motocicletas, el diésel que mueve principalmente la carga pesada y de pasajeros, así como también motores fuera de borda de alto caballaje y maquinaria agroindustrial, el kerosene que mueve todos los días toda la flota aérea son apenas algunos ejemplos de lo indispensable de la energía en nuestras vida.

La mayoría de las veces usamos cientos de veces todo tipo de vehículos para transportarnos, sin detenernos un poco a estudiar que tan eficiente son los procesos que emplean los motores de combustión interna usados, no es el interés de este documento explicar dicha eficiencia en este capítulo, sino recapacitar en esta rama de la ingeniería y en especial de la termodinámica.

Quizás hemos mal utilizado la ingeniería a la hora de construir y usar los vehículos que usan motores de combustión interna. Quizás están mal diseñadas las ciudades para su uso o simplemente falta mucha investigación y desarrollo en esta industria que se ha esforzado principalmente por mostrar lujosos y muy variados diseños, pero que en la parte ingenieril faltaría mucho para demostrar que el sector avanza tecnológicamente para proteger el medio ambiente y mejorar la eficiencia energética de los mismos.

Miles de trabajos de investigación se han desarrollado en diferentes partes del mundo en base a la eficiencia de los autos propulsados por derivados del petróleo y solo en prototipos de la fórmula uno y en automóviles de muy alta gama podrán verse los adelantos científicos, cuando se habla de eficiencia energética global.

Cuando un motor de combustión interna está bien sincronizado y todo su sistema está en perfectas condiciones la eficiencia puede llegar a ser “alta”, por ejemplo en un motor diésel el rendimiento está en un rango de 35-45% y en un motor otto o motor a gasolina como es usualmente llamado el rendimiento puede ser de 25-35%; esta eficiencia se relaciona con

la relación de compresión de los motores y como la energía calórica del combustible es transformada en movimiento, esté el automóvil en un aparcamiento con el motor encendido o vaya a cierta velocidad. Sin embargo no es a este tipo de eficiencia a la que nos referiremos sino más bien a la eficiencia global del vehículo y como puede esta, generar un consumo gigante sin mayores usos.

En Colombia hay cerca de cinco millones de vehículos casi 8 por cada 100 habitantes y esta cifra seguirá creciendo y los vehículos no son lo suficientemente eficiente, principalmente en momentos donde los motores no están cumpliendo la función para la que están contruidos; darle potencia para avanzar, sino simplemente para mantener los motores encendidos, ya sea en el proceso de calentamiento del automotor, en un semáforo, en un pare, en un estacionamiento o lo que es peor en un trancón y lo malo es que el común de la población ya hace de los trancones un factor cotidiano de la vida diaria.

Desde este punto de vista la cantidad de combustible que se utilizan en los procesos mencionados anteriormente es gigantesco e incluso igual al consumido realmente para transportarnos, sin embargo este tema no está formal y seriamente estudiado de manera generalizada.

A lo anteriormente mencionado hay que sumarle un tema que ha sido discutido en la industria automotriz pero que no es menos importante a los mencionados con antelación. Cuando un automotor, ya sea un tracto camión articulado de 52 toneladas o un vehículo familiar de menos de un cuarto de tonelada y cuando este va descendiendo por una cuesta, sigue utilizando la energía producida por su motor ya sea para su desplazamiento como para funciones de dirección, aire acondicionado y frenado. Y no hace uso de la energía potencial adquirida al estar en un lugar alto en relación con su objetivo de descenso que se tenga.

Otro problema de eficiencia radica, cuando un automotor frena gran parte del trabajo realizado en el frenado es transformado en calor y desaceleración sin embargo esta energía podría ser usada o acumulada para darle nuevos usos en el mismo. Este tema también ha sido citado por los fabricantes de la F1 donde, dichos vehículos, poseen ciertos elementos donde se almacena la energía del frenado para generar electricidad y esta usada para dar mayor aceleración en el arranque con motores eléctricos adicionales.

En conclusión puede verse que a esta industria tan prospera y creciente le hace falta tener por un lado más conciencia ambiental y más decisión ingenieril en la fabricación de los

automotores del presente y que ojala, sean solucionadas dichas tecnologías para las generaciones futuras, sin dejar de lado la vista a las energías alternativas; como la electricidad, el hidrógeno y el estudio continuo de la eficiencia energética de los procesos.

3. TECNOLOGÍA Y LEGISLACIÓN ACTUAL CON POTENCIAL DE IMPLEMENTARSE PARA LOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS.

La similitud en todos los procesos del upstream entre la industria geotérmica y de hidrocarburos conlleva a pensar que el marco político energético, las instituciones educativas que actualmente imparten ingeniería de petróleos, las agremiaciones energéticas y la industria en general podrían direccionar sus objetivos misionales hacia ambas industrias, con el fin de aumentar los recursos energéticos del país, así como también generar sinergias entre la industria petrolera y geotérmica que mejoraría la eficiencia individual de cada una.

Con ello se diversificaría la canasta energética colombiana y también se vislumbraría más oportunidades para los profesionales de la industria petrolera quienes pueden aportar su conocimiento ingenieril en los procesos correspondientes a la exploración, producción, caracterización de yacimientos y otras etapas del desarrollo de campos geotérmicos lo cual daría un empuje relevante a la economía nacional.

A continuación se describen brevemente estudios en la literatura, de investigaciones desarrolladas a nivel mundial tanto petrolero como geotérmico que buscan dar solución a los inconvenientes ya mencionados en el capítulo anterior.

3.1. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA.

En la industria petrolera es común encontrar un sinnúmero de pozos que alcanzan altos cortes de agua convirtiéndose con el tiempo en una carga improductiva para el desarrollo del campo. Estos pozos inviables económicamente para muchos, son una fuente de recursos energéticos importantes para otros. Aunque no es una iniciativa nueva si es un hecho que cuenta con muy pocos recursos e interés por parte de los gobiernos y compañías petroleras para desarrollar este tipo de enfoques de eficiencia energética.

Aun así el panorama actual de obtención y consumo de energía está cada más influenciados por temas como la degradación del medio ambiente y el cambio climático, lo cual ha incentivado a algunos sectores del mundo a apoyar este tipo de prácticas con el fin de entender la mejor manera de explotar este recurso como fuente de calor, útil de muchas formas en un campo petrolero. Kujawa y su equipo fueron los primeros en llevar a

cabo una investigación aplicada en infraestructura petrolera, usando pozos estratigráficos profundos para la obtención de energía geotérmica, infiriendo al final del proyecto que el caudal de flujo y el aislamiento de los pozos tienen importantes efectos sobre el proceso de transferencia de calor.⁵² Los estudios de Bu et al. (2011) aprovecharon los conocimientos previos del equipo de Kujawa para implementar y mejorar un ciclo termodinámico muy conocido en la ingeniería; el Ciclo Rankine, con el cual utilizaron el calor de los pozos abandonados para convertirlo en trabajo en un campo de hidrocarburos, donde los mejores resultados fueron obtenidos en cabeza de pozos con un rango de temperatura entre 60 a 150 °C.⁵³

Con el fin de producir simultáneamente electricidad y calor a partir de los fluidos calientes de pozos petroleros de media entalpía, Tailu Li et al. (2012) desarrollaron un modelo de cogeneración eléctrica implementando una planta de ciclo Rankine orgánico combinada con un sistema de calentamiento y recuperación de crudo.

Los pozos petroleros con altos cortes de agua (cortes de agua mayor a 89%) son usados como pozos geotérmicos generando no solamente ahorro en los costos de gasto eléctrico sino también recupera grandes cantidades de crudo, lo cual incrementa la eficiencia económica. Las plantas de poder geotérmicas en campos de hidrocarburos tienen sus propias ventajas como se ilustra a continuación:

- ✓ Así como otros tipos de proyectos geotérmicos estas plantas no consumen combustibles fósiles.
- ✓ El corte de agua utilizada por la planta del ciclo Rankine se puede usar como fuente de calor para el sistema de tratamiento térmico del crudo.
- ✓ Genera electricidad para el uso del mismo campo petrolero y lo que sobra se puede vender a la red pública del sector que rodea el proyecto.

⁵² Kujawa, T. Nowak, W. Stachel, A.A. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy, Energy 31 (2006).

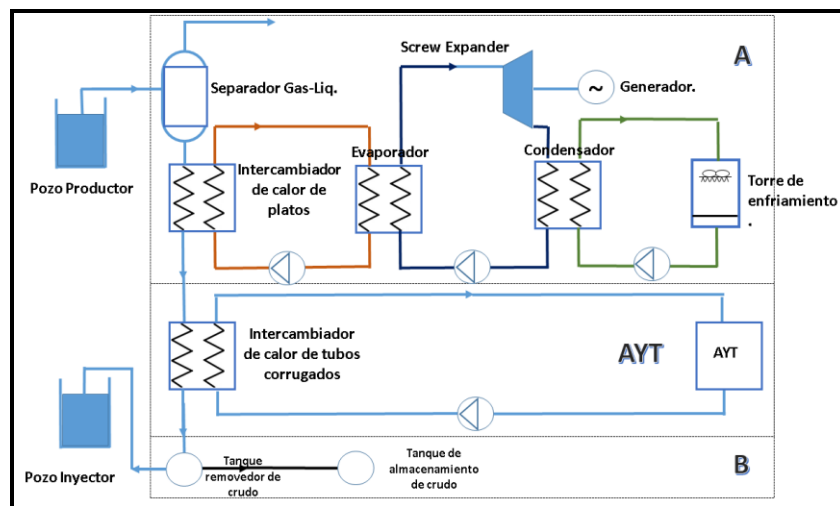
⁵³ Bu, X. Ma, W. Li, H. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells (2011).

Descripción del sistema:

Los componentes del sistema de cogeneración como lo muestra la figura 7 consisten de tres subsistemas: El subsistema A el cual comprende el Ciclo Rankine Orgánico, el subsistema AYT correspondiente al almacenamiento y transporte de crudo y el subsistema B de recuperación de petróleo.

A continuación se explicaran cada una de las funciones de los subsistemas que hacen parte del proceso de cogeneración:

Figura 7. Ciclo Rankine Orgánico.



Modificado de: Li, T. Zhu, J. Zhang, W. Cascade utilization of low temperature geothermal water in oilfield combined power generation, gathering heat tracing and oil recovery (2014).

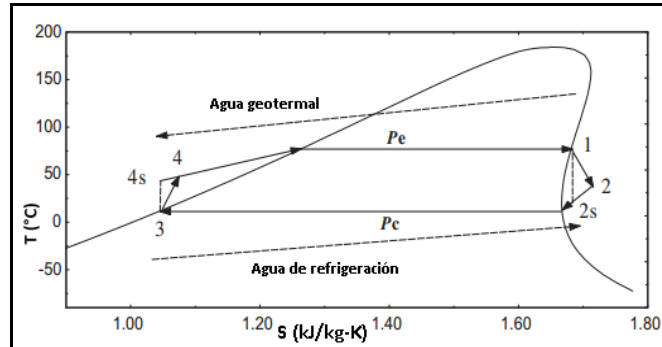
Ciclo Rankine orgánico (A):

El proceso como se muestra en la figura 7 consiste en la implementación de un fluido orgánico con un punto de ebullición menor al del agua que alimenta un ciclo Orgánico Rankine (COR). Este sub sistema "A" se encuentra está compuesto principalmente por un intercambiador de calor, evaporador, una turbo expander, un generador eléctrico, un condensador, una torre de enfriamiento y una bomba de alimentación.

Esta sección del sistema se encarga de aprovechar los fluidos que provienen de los pozos productores con altos cortes de agua y temperaturas aptas para la cogeneración de electricidad. El flujo proveniente del pozo productor inicialmente es dirigido a un separador gas-petróleo para separar el gas y así evitar bajos rendimientos durante el proceso de transferencia de calor. La corriente saliente del separador se dirige a un intercambiador de

calor de platos de titanio el cual cuenta con un limpiador ultrasónico a la entrada para evitar futuras precipitaciones de sólidos en las líneas. En este intercambiador de platos se calienta un flujo de agua limpia (líneas rojas), la cual ingresa al evaporador transfiriendo calor a un fluido de menor punto de ebullición (líneas verdes) quien se expande al ingresar a la turbo expander, convirtiendo finalmente la energía térmica en electricidad.

Figura 8. Diagrama T vs S entalpia ciclo Rankine.



Modificado de: Li, T. Zhu, J. Zhang, W. Cascade utilization of low temperature geothermal water in oilfield combined power generation, gathering heat tracing and oil recovery (2014).

En la figura 8 de T vs S (entalpía) se observa todo el proceso que se lleva a cabo durante la etapa de cogeneración de electricidad. Inicialmente el fluido geotermal transfiere calor en el intercambiador de calor de platos a una corriente de agua la cual se dirigirá a la entrada del evaporador donde el fluido orgánico absorberá calor de esta con el fin de generar alta presión de vapor (proceso 4-1), luego el flujo de vapor se dirigirá al screw expander en donde su entalpia se convierte en trabajo (proceso 1-2). El vapor de baja presión sale del screw expander y es dirigido hacia el condensador donde es licuado nuevamente (proceso 2-3). El líquido disponible a la salida del condensador es presurizado por medio de una bomba de alimentación y enviado nuevamente al evaporador (proceso 3-4). Luego un nuevo ciclo comienza.

Almacenamiento y transporte de crudo (AYT).

En este punto del sistema se utiliza la corriente de fluidos de producción provenientes del subsistema de cogeneración que aún conserva una cantidad aprovechable de calor para aumentar la temperatura del crudo por medio de un intercambiador de calor de tubos corrugados.

La energía térmica que se aprovecha a través de este medio puede ser usada para reemplazar hervidores ya sean a base de petróleo o gas y así proveer calor al sistema de almacenamiento y transporte de crudo. Esta transferencia de calor disminuirá la viscosidad del crudo con el fin de mejorar el transporte del hidrocarburo para su venta.

Subsistema de recobro de petróleo (B).

La corriente de fluido geotermal es dirigida a los tanques removedores de crudo en donde el crudo se mueve hacia la parte superior y el agua hacia la parte inferior de los tanques debido a la diferencia de densidades entre el petróleo y el agua. El hidrocarburo recuperado fluye hacia las líneas de recolección. El agua que se separa de esta última etapa se vuelve a reinyectar al yacimiento con el fin de cerrar el ciclo global.

Para evaluar el rendimiento de esta iniciativa Tailu junto con la universidad de Tianjin y la Corporación Nacional de Petróleo de China construyeron la primera planta binaria COR instalada en el campo petrolero Huabei en China. Para entender y prever mejor el comportamiento y rendimiento de todo el ciclo, se desarrolló un modelo numérico validado con los mismos datos que se obtienen de las instalaciones. Con este modelo se puede evaluar el potencial geotérmico de campos petroleros colombianos a partir de un diseño preliminar de la planta basado en los parámetros propios de caudal, temperatura y presión en cabeza de pozo sin necesidad de invertir altas sumas de dinero en estudios prefactibilidad.

3.2. ENERGÍA GEOTÉRMICA A PARTIR DE POZOS PETROLEROS ABANDONADOS.

El uso de pozos abandonados ha sido abordado desde diferentes perspectivas conceptuales en la academia por una variedad de entes investigativos debido al potencial económico de aprovechar inversiones presuntamente sin ningún valor comercial y estratégico para los campos petroleros. Este tipo de investigaciones es un aporte no solo

al campo petrolero sino igualmente para el renglón de la geotérmica, un avance que podría cambiar el curso de las futuras inversiones en abastecimiento de regiones enteras.⁵⁴

Uno de los más complejos retos técnicos en las plantas geotérmicas es la reinyección de los fluidos. Los fluidos geotérmicos tienen propiedades fisicoquímicas no adecuados para los ecosistemas terrestres y los materiales de todas las facilidades presentes en el proceso. Por lo tanto estos fluidos deben ser tratados y reinyectados en el subsuelo. Esta operación genera altos costos económicos por el requerimiento de la perforación y mantenimiento de pozos adicionales a los productores, además de los tratamientos y bombeo de los mismos fluidos.⁵⁵

Una posible alternativa de enfrentar los anteriores retos es el uso indirecto de sistemas de extracción de calor instalado en pozos de hidrocarburos abandonados: el intercambiador de calor en pozo (en sus siglas en inglés WBHX). Este tipo de completamiento de pozo, permite la extracción de calor usando un fluido calor portador inyectado por el anular del pozo abandonado acondicionado previamente.

El uso de este intercambiador de calor en pozo evita el uso de fluidos geotérmicos (producidos desde un pozo geotérmico) y los impactos ambientales que estos acarrearán así como también los requerimientos energéticos para la reinyección son fuertemente reducidos. Los problemas de corrosión y formación de escamas son igualmente evitados por el no uso de fluidos sucios sino por aquellos ya tratados previamente.

El uso de pozos petroleros para la aplicación del WBHX, se justifica por la reducción de los costos de perforación al aprovechar pozos ya abandonados en un campo de crudo y por el aumento de la factibilidad económica de la planta geotérmica, debido al recorte de gastos al evitarse la perforación de nuevos pozos (generalmente corresponden al 50% del total de los costos del proyecto).⁵⁶

A partir de los estudios realizados por diferentes autores se ha determinado y evaluado la dependencia de la factibilidad de las plantas de poder WBHX de las tasas y el aislamiento térmico. Además otros importantes parámetros para considerar están el gradiente

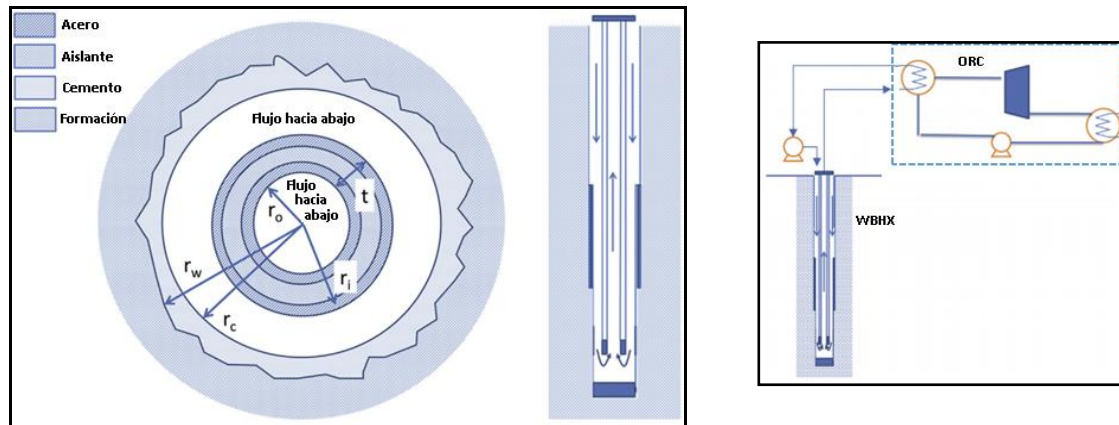
⁵⁴ Melinder, A. Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working, Doctoral Thesis (2007).

⁵⁵ Templeton, J.D. Ghoreishi-Madiseh, S.A. Hassani, F. Al-Khawaja, M.J. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal, Energy 70 (2014).

⁵⁶ Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo. Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad (2013).

geotérmico local, la profundidad de los pozos y de las propiedades termodinámicas de los fluidos portadores de calor.⁵⁷

Figura 9. Esquema del Intercambiador de calor en fondo de pozo.



Modificado de: Alimonti, C. Soldo, E. Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger (2014).

En la figura 9 se ilustra el esquema del diseño del WBHX así como una sección transversal. Como se ilustra en el esquema, el fondo de pozo se cierra y una doble sarta coaxial de tubos son introducidos al pozo rellenos en el espacio anular entre ellos por aislante. El fluido portador de calor se bombea al intercambiador de calor por el espacio anular entre el revestimiento del pozo y la cubierta externa del tubo productor. Durante el descenso del flujo, el fluido inyectado adquiere calor desde las paredes del subsuelo circundante.

Al alcanzar el fondo del pozo el fluido asciende por la parte interna del tubo de producción hacia la cabeza de pozo. El tubo de producción como ya se había mencionado son dos tubos coaxiales en donde la brecha entre los dos tubos es relleno con aislante para reducir el intercambio de calor entre el flujo descendente con el flujo ascendente.⁵⁸

La energía geotérmica producida puede ser usada en conjunto con una planta termal para fines recreativos en zonas de bajas temperaturas o puede ser directamente convertido en energía eléctrica por medio de un Ciclo Orgánico Rankine (COR), como se ha mostrado previamente. Otros investigadores se enfocaron sobre el uso de un sistema de generación

⁵⁷ Li, Ch. Nian, Y. Wang, C. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells, Energy 59 (2013).

⁵⁸ Davis, A. Michaelides, E. Geothermal power production from abandoned oil wells, Energy 34 (2009).

eléctrica directo, pero este tipo de plantas geotérmicas no son viables para la mayoría de campos petroleros debido a las bajas temperaturas encontrados en los pozos perforados.⁵⁹ En vez de este tipo de plantas se ha propuesto el uso de una planta de ciclo binario que consta de dos pasos de intercambio de calor.

En primer lugar un fluido de trabajo es circulado por un intercambiador de calor de tubos dobles en donde este adquiere calor directamente de la roca (inyección de un fluido al pozo en configuración con el WBHX). En el segundo paso el fluido de trabajo intercambia calor con un fluido de menor punto de ebullición del sistema COR.⁶⁰

Varios estudios han presentado modelos numéricos para analizar el uso del concepto del WBHX tanto en pozos geotérmicos existentes así como en la modernización de pozos petroleros.⁶¹ De todos los modelos existentes en artículos, es importante resaltar el elaborado por C. Alimonti, E. Soldo (2015) quienes evaluaron el sistema con dos fluidos de trabajo diferentes: Agua y aceite térmico, los cuales nunca han sido considerados en este tipo de aplicaciones. Los investigadores se enfocaron sobre la optimización del WBHX para maximizar la extracción de calor. También se evaluó con diferentes diámetros de tubería con el fin de optimizar la configuración geométrica para el caso específico de estudio. Cabe resaltar que los estudios y resultados desarrollados por Alimonti son obtenidos en base a modelos teóricos construidos a través de paquetes computacionales los cuales aún no han sido aplicados a un caso real.

Existe un caso de aplicación en un campo petrolero llevado a cabo por Younes Noorollahi et al. (2014) de la universidad de Tehran quienes diseñaron un modelo numérico aplicado directamente a la evaluación de dos pozos del campo petrolero Ahwaz en el sur de Irán, donde fueron simulados numéricamente usando una técnica 3D para la extracción de calor. En este trabajo se encuentra información sobre el estado mecánico de los pozos así como los datos de temperatura, presión y otros parámetros necesarios para la corrida del modelo numérico. La transferencia de calor entre el fluido inyectado al pozo y la roca circundante de las paredes del pozo fueron simulados. Los resultados de la simulación

⁵⁹ Cheng, W. Li, T. Nian, Y. Xie, K. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells (2014).

⁶⁰ Alimonti, C. Gnoni, A. Harnessing the fluids heat to improve mature oil field: the VillafortunaeTrecate case study, J. Petrol. Sci. Eng. 125 (2015).

⁶¹ Nalla, G. Shook, G. Mines, G. Bloomfield, K. Parametric sensitivity study of operating and design variables in wellbore heat exchangers, Geothermics (2005).

fueron optimizados por parámetros de temperatura y caudales a la entrada y salida. Los resultados revelaron que además del gradiente geotérmico y el caudal de flujo másico de entrada, la geometría del revestimiento del pozo y el tamaño de los diámetros internos de los pozos fueron esenciales para determinar la tasa de extracción de calor a la salida del pozo.⁶²

3.3. ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE ESFUERZOS BASADO SOBRE MECANISMOS FOCALES E IMÁGENES DE RETROPROYECCIÓN EN COLOMBIA.

Gómez-Alba et al. (2015) llevaron a cabo un estudio en la región de Puerto Gaitán en la cual hicieron uso de los datos de la Red Nacional de Sismología de Colombia (RNSC) para investigar la relación existente entre al menos 156 temblores detectados en los alrededores de ese municipio de magnitud de 2.8 a 4.4 en la escala de Richter en el periodo de abril de 2013 y diciembre de 2014 con la actividad de extracción de crudo en los campos circundantes de ese sector del país.

El interés por investigar la actividad sísmica en el municipio de Puerto Gaitán surge a raíz de observarse un aumento de terremotos en los años 2013 y 2014 en una zona tectónicamente inactiva. A partir de estos sucesos el equipo de Gómez construyó una metodología de investigación para dar con la fuente de la actividad sísmica anormal de la zona, comenzando con la construcción de un modelo estructural de la geología del área de estudio, junto con un esquema de la estratigrafía de los campos petroleros presentes en la región, con el fin de entender las posibles causas de los terremotos.

Por medio de los sismogramas recolectados por la RNSC y un algoritmo denominado imágenes de retrospección se construye un modelo 3D en el espacio de todo los epicentros de los terremotos que se han obtenido entre los años 2013 y 2014. Con este algoritmo se puede visualizar cada uno de los focos sísmicos ubicados en el espacio por medio de coordenadas y profundidad caracterizadas en el tiempo.

Con este método se pudo establecer el origen y la tendencia de la orientación de las ondas sísmicas con el propósito de prever los posibles catalizadores de estos eventos atípicos en la región.

⁶² Noorollahi, Y. Pourarshad, M. Jalilinasrabad, S. Yousefi, H. Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oilfield in southern Iran (2014).

Con todos los resultados obtenidos dentro de la metodología de investigación integrada se indujo la aparente relación entre la sismicidad anormal del 2013 al 2014 con los picos de producción de petróleo obtenidos en los campos de crudo. No se habían registrado anomalías sísmicas antes de ese periodo salvo por unos terremotos registradas en esa área en el mismo periodo de tiempo cuando se reportaron los resultados de producción que llegó a su máximo en septiembre del 2011. Altos niveles de producción fueron alcanzados en Febrero de 2013 y desde esa fecha el número de eventos sísmicos se manifestaron agudamente con un aumento constante de la magnitud de la misma actividad. El fuerte pico de producción durante la totalidad del año 2013 aparentemente se correlaciona con los terremotos en el mismo año. Al inicio del 2014 se observó una disminución de declinación en la producción acompañado de un año atestado de los mayores eventos registrados en el área lo cual apoya la hipótesis que la actividad sísmica ocurre por la liberación de grandes acumulaciones de energía.

Otro pico en la producción tomó lugar en Mayo del 2014, este pico fue acompañado igualmente por la ocurrencia de la más fuerte actividad sísmica en ese año de magnitud 4.4 en la escala de Richter. Con los resultados de las imágenes de retroproyección y del Tensor Momento Sísmico se obtuvo la descripción y estimación de las propiedades de las fracturas del subsuelo de los campos del área circundante de Puerto Gaitán incluyendo la orientación, trayectoria y velocidad de propagación que en complemento con los datos de los mecanismos focales se determinó que en el área existe la presencia de un fallamiento de tipo normal debido a la naturaleza de los eventos sísmicos promueven movimientos de masa en dirección normal (arriba y abajo).

Precisamente ese tipo de movimientos es característico en los campos petroleros bajo inyección de agua durante la producción generando un movimiento de la roca hacia arriba con respecto a sus formaciones circundantes. Inversamente cuando la producción de petróleo es muy alta, la remoción de los fluidos en el yacimiento hace que la roca tienda a colapsarse y por consiguiente genera un desplazamiento de la roca. Tanto la inyección de agua así como la experimentación de un método recobro mejorado térmico con altos volúmenes de producción fueron comunes en los años 2013 y 2014 en Puerto Gaitán. En esa misma similitud la distribución de esfuerzos obtenidos también validaron los resultados de identificación del mecanismo generador de los movimientos telúricos. La orientación del esfuerzo primario está en la componente vertical de tal manera que está asociada con los desplazamientos del subsuelo hacia arriba como abajo.

La propagación y la posible orientación de las facturas para el área de estudio contrastan con la tendencia de la orientación de la falla regional. En concordancia con los mecanismos focales y la orientación de los esfuerzos obtenidos se puede inferir que los terremotos no están relacionados con la reactivación de fallas preexistentes en el área más bien ellos están relacionados con las operaciones de producción de petróleo.

En conclusión se obtuvo una relación existente de la relación espacio temporal entre los picos de la producción de crudo y el incremento notable de eventos sísmicos. Además es importante destacar la utilidad de las imágenes de retroproyección que ofrecen una buena aproximación de la orientación de las fracturas las cuales son validadas con los resultados obtenidos a través del cálculo del Tensor Momento Sísmico estimando los mecanismos focales culpables de los terremotos.

Todo este trabajo es relevante porque se muestra la forma de integrar los fenómenos naturales o inducidos de sismicidad para la mejor comprensión del comportamiento que los yacimientos de crudo que viven durante toda la etapa productiva acoplándolos con parámetros geomecánicos y geológicos de la región de estudio.⁶³

3.4. CORRELACIÓN ENTRE LA MICROSISMICIDAD Y LA DINÁMICA DEL YACIMIENTO EN UN ÁREA TECTÓNICAMENTE ACTIVA DE COLOMBIA.

En 1992 una red sismológica permanente de 10 estaciones superficiales fueron instaladas en Cusiana y Cupiagua para obtener datos para modelos de riesgo sísmicos necesarios para el diseño de la infraestructura de los campos. La red ha estado funcionando continuamente por 23 años recolectando una vasta base de datos de alta calidad en un rango de magnitud sísmico por debajo de 1.0 sobre la escala de Richter.

En el tiempo, la red sismológica de Cusiana y Cupiagua ha sido usada para diferentes propósitos. Durante los últimos años, se ha hecho cada vez más evidente que la red y sus datos es un activo muy valioso para la evaluación de las condiciones pertinentes a las operaciones de producción e inyección dentro de los yacimientos y áreas adyacentes.

⁶³ Dasilva, A. Gomez, Y. Villa, M.A. Yoris, F., Morales, D. Oil distribution in the Carbonera formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales (2014).

Desde el punto de vista de caracterización de yacimientos y operación de producción, el monitoreo micro sísmico (también conocido como sísmica pasiva) ha tenido dos aplicaciones principales en Cusiana y Cupiagua: para identificar la producción e inyección vías de alta transmisibilidad inducida y sus variaciones temporales, y la imagen de la orientación, la extensión, la complejidad, y el crecimiento temporal de las fracturas hidráulicas.

Osorio, G. et al. (2008) centraron su trabajo en la primera de estas aplicaciones: cómo la microsismicidad se ha utilizado como una herramienta de vigilancia para seguir el movimiento de los fluidos del yacimiento a distancia de pozo. Se discute la metodología para la interpretación de los datos. Finalmente, los resultados parciales se presentan mostrando cómo se está aplicando el monitoreo microsísmico a: evaluar los cambios de transmisibilidad debido a los cambios de los esfuerzos y la presión de poro a través del tiempo.

El análisis de los datos muestra una fuerte correlación entre la dinámica del yacimiento y la producción de micro sismicidad inducida de los campos Cusiana y Cupiagua, con un gran potencial como herramienta de vigilancia para mejorar la caracterización de yacimientos y la correspondiente gerencia. La experiencia muestra que pequeñas fluctuaciones de presión de poro modifican los esfuerzos normales efectivos y/o los coeficientes de fricción en rocas en una región lo suficiente grande, para producir microsismos espontáneamente. Así que se tendrían microsismos inducidos por la inyección de fluidos y microsismos espontáneos. Este cambio en la condición de los esfuerzos y los cambios en la presión tienen una naturaleza más severa en campos maduros y en yacimientos fracturados, por lo tanto la actividad microsísmica se caracteriza por su alta intensidad.

Este método consiste en usar la misma metodología de Sebastián Gómez-Alba et al. pero aprovechando la actividad sísmica pasiva que se genera en la inyección de gas al yacimiento. A partir de los sismogramas se pueden construir a través de Petrel modelos en 3D de la geología del yacimiento, que en complemento con los registros UBI (Ultrasonic Borehole Imager), registros eléctricos acoplados con los modelos estratigráficos pueden

monitorear en tiempo real la dirección de los fluidos inyectados y así prever la trayectoria que el frente de gas va a tomar.⁶⁴

3.5. MODELO 3D HIDROGEOLÓGICO Y GEOMECÁNICO PARA EL MEJORAMIENTO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO EN THE GEYSER EN CALIFORNIA.

En este estudio, el modelamiento integrado acoplado y las observaciones de campo fueron usados para construir un modelo hidrogeológico y geomecánico en tres dimensiones de un sistema geotérmico mejorado (EGS) en la parte noroeste del campo geotérmica The Geysers, California. Se ha construido un modelo y caracterizado las propiedades hidráulicas y mecánicas de las capas geológicas correspondientes y un sistema de múltiples zonas de cizalla intersectadas. Esta caracterización se llevó a cabo a través un modelamiento de procesos acoplados de un año de estimulación inyectiva con un simultáneo monitoreo en campo de la presión del yacimiento, micro sismicidad y deformaciones superficiales. Se encontró que el análisis de las deformaciones de superficie son particularmente un desafío así como las deformaciones superficiales sutiles causadas por la inyección que tiene lugar por debajo de 3 km de profundidad ya que se entremezclan con las deformaciones causadas por los efectos tanto tectónicos como los superficiales estacionales asociados a las precipitaciones.

Sin embargo, a través de un análisis detallado de los datos de campo se identificaron deformaciones asociadas con la inyección. Propiedades hidráulicas y mecánicas de las capas de roca pertinentes y zonas de cizalla se determinaron utilizando un modelo hidrogeológico y geomecánica 3D. Propiedades hidráulicas se determinaron mediante análisis inverso mediante el ajuste de la evolución de presión en los pozos de monitoreo circundantes a la inyección.

Las propiedades mecánicas fueron estimados por comparación de la microsismicidad observada y por el ajuste del desplazamiento vertical predicho con las deformaciones de la superficie medidos por satélite. Los resultados muestran la importancia crítica de considerar el sistema de fallas regional, especialmente las fallas a nivel de yacimiento y

⁶⁴ Osorio, G. Penuela, G. Otalora, O. Correlation Between Microseismicity and Reservoir Dynamics in a Tectonically Active Area of Colombia (2008).

zonas de cizalla que modifican el flujo de agua de inyección y la difusión de presión de vapor.

3.6. OPTIMIZACIÓN DE UBICACIÓN DE POZOS Y EL CONTROL PARA UNA PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA BAJO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA.

Este estudio aplica una técnica de optimización eficiente basado en una técnica multivariante de regresión spline adaptativo (MARS) para determinar el diseño óptimo y la ingeniería de una posible operación de producción geotérmica cerca de Superstition Mountain en el sur de California, EE.UU.. Chen, M et al. (2014) desarrollaron un modelo estadístico basado en MARS el cual permite la evaluación de los impactos de los parámetros de diseño específicos de ingeniería en proyectos con alta incertidumbre geológica, como un medio para comprender y maximizar la rentabilidad de la operación de producción.

A partir del acoplo del modelo de simulación hidrotermal y el modelo sustituto basado en MARS se investigaron los efectos de incertidumbres geológicas (tamaño de la falla, permeabilidad de la unidad geológica) sobre la optimización del espaciamiento y distribución de los pozos y el control (ubicación de los pozos de reinyección caudales de producción) del diseño del prospecto a estudiar.

El modelo MARS se desarrolló inicialmente a partir de un conjunto de datos de formación generada por un conjunto finito de modelos hidrotermales computacionalmente complejos aplicados al prospecto. Su aplicación revela que las variables de ingeniería óptimas de diseño pueden diferir considerablemente asumiendo diferentes opciones de propiedades de flujo hidrotermales, los cuales, a su vez, indica la importancia de reducir la incertidumbre de las propiedades geológicas clave. Las principales fuentes de incertidumbre en el sistema natural se identifican y clasifican primero por una habilidad de sensibilidad de cuantificación de orden eficiente del MARS, que luego se utiliza para ayudar a evaluar el efecto de la incertidumbre sobre resultados geológicos optimizados.

En la perspectiva del Sur de California, este análisis de sensibilidad de parámetros sugiere que la circulación del agua subterránea a través de estructuras altamente permeables, en lugar de la conducción de calor a través de granito impermeable, es el método de transferencia de calor primario durante la extracción geotérmica. Historiales del yacimiento simulados utilizando parámetros óptimos con diferentes limitaciones se analizan y

comparan para investigar la longevidad y el máximo beneficio de los recursos geotérmicos. La comparación muestra que la longevidad y el beneficio son muy propensos a ser sobreestimado por optimizaciones sin restricciones apropiadas en condiciones naturales. Además de la producción de energía geotérmica, este enfoque de optimización también se puede utilizar para gestionar otras operaciones de recursos geológicos, tales como la producción de hidrocarburos o de secuestro de CO₂, bajo condiciones de yacimiento inciertos.⁶⁵

3.7. TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN CIRCULACIÓN EN REVERSA DE GAS-LIFT.

Existen muchos problemas asociados a la perforación de pozos geotérmicos para la puesta en marcha de la producción de yacimientos de agua a alta temperatura en el subsuelo. Estos problemas ya han sido puestos sobre la mesa en el capítulo anterior pero a continuación se expone un ingenioso avance que ayuda a mitigarlos a la mayoría de ellos.

La perforación de gas-lift en reversa es una tecnología de perforación de avanzada caracterizada por su alta eficiencia, larga vida de la broca, buena estabilidad de pozo, ahorro en tiempo de perforación, alta fiabilidad en perforaciones de formaciones complejas y baja intensidad de trabajo. Una aplicación de este tipo de perforación fue puesta en marcha en la isla Jiaoliu en la ciudad china de Dalian donde los resultados fueron plasmados y analizados por MA Xiumin et al. (2014) quienes describen el principio de la tecnología y los avances que se obtuvieron en dicha experiencia durante la perforación.

El lodo de perforación se inyecta por la parte del anular del pozo con el objetivo de levantar los recortes hacia adentro de la tubería y mantener una presión hidrostática mayor a la de las formaciones. La sarta de perforación consiste de una sección de drill pipe de doble pared acoplada al resto de drill pipe y BHA. A través del drill pipe de doble pared se inyecta aire el cual se mezcla con el lodo que ha ingresado por la boca de perforación diluyéndolo; la mezcla fluye pozo arriba debido al peso de la columna hidrostática ejercida

⁶⁵ Chen, M. Tompson, A. Mellors, R. Abdalla O. An efficient optimization of well placement and control for a geothermal prospect under geological uncertainty (2014).

por el lodo en el espacio anular del drill pipe y las paredes del pozo la cual es mayor al de la mezcla. A medida que los recortes del fondo de pozo son continuamente sacados hacia la superficie estos son dirigidos a los tanques de lodo, después de la precipitación de los recortes el lodo nuevamente es dirigido al pozo creando así un sistema continuo de circulación en reversa.⁶⁶

La aplicación de este proceso puede mejorar el levantamiento de recortes y la eficiencia de la perforación, mientras no se aplique en formaciones de arcillas hinchables y granos con diámetros tipo grava para evitar la pega del interior de la tubería doble de perforación y el no levantamiento de recortes muy pesados.

Su eficiencia como sistema en general es óptima en la perforación de pozos profundos con grandes diámetros, en los cuales mejora la velocidad de arrastre de los recortes y la eficiencia de perforación, resolviendo problemas provocados en formaciones frágiles y débiles. La aplicación de este proceso de circulación de gas-lift puede alcanzar a obtener largas secciones de corazones de perforación en las más complejas formaciones, reduciendo el número de viajes y la probabilidad de los incidentes de inestabilidad de las paredes del pozo.

Zhang Yong et al. (2014) identificaron tres problemas relacionados al diseño de este tipo de configuración de sarta de perforación:

- La capacidad de carga del Swivel de agua-aire se ve críticamente afectada a medida que la profundidad de perforación va aumentando, ya que el peso que soporta es cada vez mayor y se vuelve más propenso a fallas.
- Bloqueos en la cámara de mezcla agua-aire.
- Precipitación de escamas en la tubería doble de perforación.

Zhan y su equipo reforzaron cada uno de los componentes mencionados, con el fin de asegurar una mejor resistencia al peso de todo la sarta de perforación, logrando penetrar a mayores profundidades con menos de la mitad de inconvenientes que se tenían con su modelo predecesor. Además Zhan llego a la conclusión al aplicar estos correctivos que el método de perforación es más efectivo en pozos con profundidades menores a 14763 fts

⁶⁶ Xiumin, M. Yue, Y. Luheng, Q. Research and Application of Gas-lift Reverse Circulation Drilling Technology to Geothermal Well Construction in Dalian Jiaoliu Island (2014).

debido a los grandes esfuerzos que deben soportar la sarta, torre de perforación y la Swivel para una configuración tan pesada usadas en este tipo de configuraciones además de mayores requerimientos de potencia para el compresor de aire al aumentar la necesidad de compensar mayores pérdidas de presión y columna hidrostática.⁶⁷

3.8. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO GEOTÉRMICO Y PETROLERO.

La composición química de los fluidos geotermales puede tener significativas implicaciones tanto para el diseño y operación de la planta geotérmica así como para el medio ambiente. Existe una compilación de la composición química de una gran variedad de fluidos geotermales llevada a cabo por Argonne Geothermal Geochemical Database (AGGD), la cual es accesible en el Repositorio de Datos en geotérmica cuyo contenido fue expandida aún más por la investigación llevada por Molly Finster et al. (2015). Esta investigación es una revisión que provee una base de datos sobre tecnologías específicas y asociadas con la producción de energía geotérmica. Se enfoca específicamente sobre la gestión de técnicas relacionadas a la producción y uso de los fluidos de producción en cada uno de las etapas de la planta, en su vasta mayoría usados en la producción de energía eléctrica.

A pesar de que existen una amplia variedad de constituyentes químicos geotermales la mayoría de los constituyentes de interés pueden potencialmente afectar las operaciones de la planta geotérmica. Esto incluye los sólidos totales disueltos (TDS), los no condensables (NCGs), componentes asociados con la corrosión y la formación de incrustaciones, metales pesados y la presencia de algunos materiales radioactivos (NORM).

A continuación se presentan una serie de métodos preventivos para el control de las variables antes mencionadas con el fin de evitar al mínimo los impactos en el proceso productivo de una planta geotérmica. Cada uno de los métodos se presentara reseñado en cada uno de sus respectivos elementos perjudiciales los cuales dan tratamiento:

⁶⁷ Yonga, Z. Jianliang, Z. Technical Improvements and Application of Air-lift Reverse Circulation Drilling Technology to Ultra-deep Geothermal Well (2014).

Sólidos totales disueltos (TDS): Los TDS como ya se ha expuesto refleja la salinidad debido a que estos iones se encuentran en sus formas de sal. En general el cloruro de sodio (NaCl) es el sólido disuelto predominante en la mayoría de los fluidos geotérmicos seguido por el bicarbonato, el sulfato, la sílice, el calcio y potasio. Existen dos categorías principales para la tecnología de desalinización: los métodos térmicos y los procesos de membranas.

Para los procesos térmicos el principio básico involucra el calentamiento de una solución salina para generar vapor de agua que es luego condensado en una superficie fría para producir agua líquida con menos contenido de sal. Los principales procesos comerciales desarrollados de destilación es el flasheo multietapa (MSF), destilación multiefecto (MED), y la compresión de vapor. Cada uno de estos métodos se considera una tecnología madura y fuerte. Actualmente los procesos de destilación térmica generan el 31% de la capacidad de destilación mundial.

Las membranas son diseñadas para permitir selectivamente o prohibir el paso de ciertos iones, incluyendo sales, utilizando el proceso natural de la diálisis y la osmosis. Los procesos de membrana comercialmente disponibles incluyen la osmosis inversa (RO), electrolisis, y electrolisis inversa. En los Estados Unidos los procesos de membrana son combinados a menudo con micro filtración, ultrafiltración, y/o nano filtración los cuales han emergido como tecnologías predominantes usadas para operaciones de desalinización debido a la menor intensidad del consumo de energía comparado con las técnicas térmicas tradicionales. Actualmente los procesos de membranas contabilizan el 66% de la total capacidad mundial de desalinización.

La concentración de TDS es un clave parámetro que determina la factibilidad de un número de tecnologías de tratamiento de agua. Básicamente los tratamientos llegan a ser más difíciles y costosos a medida que los TDS incrementan. En la tabla 5 se muestra una lista de las tecnologías de tratamiento más común diseñado para remover sales y otros orgánicos producidos por los fluidos geotérmicos con sus respectivas ventajas y desventajas para el uso en determinada tecnología.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de las tecnologías más comunes para el tratamiento de los TDS.

Tecnología	Sub-categoría	Ventajas	Desventajas
Proceso de membranas	Osmosis inversa	Tecnología madura. Los avances decrecen el costo de las membranas y reducen la presión requerida para flujos de agua prácticos, por tanto se minimizan los costos operacionales y energéticos. Aplicable para aguas altamente salobres.	Altas posibilidades de fallas por membranas sucias; pre tratamiento y limpiezas regulares son necesarias. No es aplicable para aguas con salinidades mayores de 25000mg/L. Sensibles a las fluctuaciones de la calidad del agua.
	Electrolisis y electrodiálisis inversa	Tecnología madura. Opera a la presión atmosférica. Más altas tasas de recobro que el RO. Aplicables para salinidades mayores a 12000mg/L aunque se obtienen mejores resultados en TDS menores a 3500 mg/L	Altas posibilidades de fallas por membranas sucias, aunque con menos implicaciones que el RO (porque este proceso es solo capaz de remover componentes iónicos desde la solución). Los costos son directamente proporcionales a la concentración de TDS; compite con RO en bajas concentraciones de TDS. Remoción limitada de componentes sin carga.
	Osmosis forzada	Usa la presión diferencial de osmosis natural. Las tasas de recobro pueden ser comparables con las del RO	Es una tecnología emergente. No provee agua de alta calidad en una sola etapa; requiere agua de producto para ser separada desde el agente osmótico.
Métodos térmicos	Destilación	Tecnología madura probada en la práctica. No está en función de la influencia de la concentración del agua de alimento. Capaz de procesar altísimas concentraciones salinas y variadas calidades de aguas. Alta calidad del agua tratada con TDS menores de 10 mg/l.	Altos costos y uso de energía, especialmente para altas tasas de recobro. Genera sal concentrada que requiere una eliminación por separado. Altas posibilidades de incrustaciones y corrosión por ello se necesita un pre tratamiento del agua de alimento. Sensible a volatilizar los contaminantes.
	Evaporización y cristalización	Capaz de procesar aguas de altas concentraciones salinas. Pueden tratar descargas de líquido a un estándar de 0 mg/L.	Altos costos y uso de energía. Potenciales incrustaciones. Desafíos en la eliminación del residuo de la sal.

	Evaporación de rocío	Las fuentes de calor puede incluir combustible inflamable, renovables o calor de desperdicio. Capaz de procesar aguas de alta salinidad. Altas tasas de recobro (>90%). Menores costos de capital que los demás métodos térmicos.	Tecnología emergente. Alta intensidad de energía sino existe una fuente de energía de desperdicio. Sensible a las condiciones atmosféricas (ejemplo temperatura y humedad).
Intercambiador de iones	Ninguno	Se obtienen aguas tratadas con baja y media salinidad.	Usa grandes cantidades de ácido. Las resinas se pueden ensuciar. Desafíos para la eliminación del agua de lavado y gasto del medio (resina). Ineficaz sobre aguas de producción con alta salinidad.
Deionización capacitiva	Ninguno	Menores costos de capital y energéticos que el RO. Capaz de remover un amplio rango de contaminantes iónicos. Altas tasas de recobro.	Tecnología emergente. Limitada aplicación de tratamiento para aguas de baja salinidad menores de 5000 mg/L. Pobre eficiencia en la remoción de componentes sin carga.

Modificado de: Finster, M. Clark, C. Schroeder, J. Martino, L. Geothermal produced fluids: Characteristics, treatment technologies, and management options (2015).

Gases no condensables:

Todos los fluidos geotérmicos contienen una fracción de NCGs que o bien están disueltos o existen como componentes gaseosos. Estos gases son liberados cuando el vapor es flasheado pero no se condensan a la normal temperatura de condensación del vapor. Como resultado ellos se colectan en el condensador de flasheo y el sistema de vapor, aumentando la contrapresión sobre el escape de la turbina al menos estos sean bombeados hacia afuera. La liberación de NCGs no se lleva a cabo en los sistemas binarios porque los gases permanecen disueltos en el fluido geotermal presurizado y son reinyectados al yacimiento.

La compresión y reinyección de los NCGs hacia el yacimiento con los fluidos geotérmicos ya usados es una opción para limitar las emisiones desde el recurso con altas concentraciones de dióxido de carbono. Sin embargo este proceso podría resultar en adicionales gastos de energía eléctrica.

En la tabla 6 se exponen algunos de las más comunes tecnologías para abordar NCGs en los fluidos producidos, junto con las claves para el uso de cada una de las específicas tecnologías.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de las tecnologías más comunes para el tratamiento de los NCGs.

Especies químicas	Agentes que propician la formación de escamas.	Opciones de mitigación
Sílice	<ul style="list-style-type: none"> - La disminución de la temperatura. - pH cercanos al neutro. - Aumento de la concentración de la sílice. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modificación de las condiciones operativas del sistema para maximizar la sobresaturación. - Modificación del pH del fluido geotermal vía acidificación. - Modificación del fluido geotermal usando componentes de ajuste que no afecte el pH o agentes reductores.
Sulfuros metálicos	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la temperatura. - Aumento del pH. - Disminución del estado de oxidación. - Disminución de la concentración del sulfuro de hidrógeno disuelto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Remoción mecánica. - Oxidación del fluido geotermal. - Acidificación del fluido geotermal.
Carbonato de calcio (calcita)	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la temperatura. - Aumento del pH. - Disminución de la concentración del dióxido de carbono. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presurización del fluido geotermal en el wellbore. - Inyección de inhibidores de incrustaciones especializados. - Acidificación del fluido geotermal.
Corrosión	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la temperatura. - Disminución del pH. - Aumento de la salinidad. - Aumento de la concentración de cloruros. - Aumento de la concentración de gas disuelto (Dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, y oxígeno). 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de materiales resistentes a la corrosión o de capa. - Remoción de especies corrosivas. - Tratamientos de sales con agentes reductores.

Modificado de Finster, M. Clark, C. Schroeder, J. Martino, L. Geothermal produced fluids: Characteristics, treatment technologies, and management options (2015).

3.9. CAPTACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN FINAL DE CO₂.

Como ya hemos visto anteriormente la industria geotérmica puede ser unas cinco a seis veces menos contaminante en cuantas emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂, que industrias que empleen combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo o el carbón. Estudiadas desde su producción hasta su consumo.

En el mundo científico y político existe un gran auge en la investigación y desarrollo en la captación, almacenamiento y uso de carbono en forma de CO₂ y existen diferentes tecnologías con las cuales se capta, transporta y almacena, sin embargo el desarrollo es insipiente para que realmente se efectuó de manera que controle las cantidades que se emiten a la atmosfera de manera antropogénica, debido a la falta de decisión política principalmente y convenios internacionales contundentes.⁶⁸

Un agravante a esta situación es que los usos principales del CO₂ en cuanto a su almacenamiento son por lo general transitorios y/o en una escala de tiempo corto; como en extintores, bebidas gaseosas, recobro mejorado de petróleo y gas natural. Además de conservación de comidas, reactivo en la producción de urea, metanol entre otras.

El objetivo será por lo tanto, mediante sus tecnologías más difundidas, obtener un flujo concentrado y seco de CO₂ a presión elevada que pueda ser fácilmente transportado a un lugar adecuado de almacenamiento de largo plazo; en su defecto, obtener un compuesto sólido estable a condiciones ambientales (carbonato de calcio) a disponer en el suelo o a emplear en la industria de la construcción.

A continuación se mostrará algunos métodos utilizados en la captación que se usan o que están en investigación.

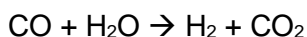
Existen tres maneras de captar el CO₂:

Previo a la combustión:

Aplicable a plantas de gasificación tales como, gasificación integral con ciclo combinado operado con carbono y obtención de H₂ a partir de combustibles fósiles o de biomasa, como se muestra en el diagrama de flujo rojo de la figura 12 implica la reacción de un combustible con parte del aire o del O₂ requerido estequiométricamente para su quema, obteniéndose gas de síntesis o gas pobre, compuesto principalmente por CO e H₂. EL CO puede hacerse reaccionar con vapor de agua en un reactor empleando un catalizador Cr -

⁶⁸ Raúl R. Prando. La captura y el almacenamiento del dióxido de carbono, CAC. Una herramienta de mitigación del cambio climático. Academia Nacional de Ingeniería, Uruguay. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. Uruguay (2011).

Fe, dando lugar a una reacción de conversión exotérmica (Shift reaction) que se optimiza entre 200° C y 600° C, Su eficiencia varía entre 60% y 90%:⁶⁹



El CO₂ obtenido (40% de concentración y 15 bar) se separa de la mezcla gaseosa mediante un proceso de absorción química o de adsorción física a presión, que emplea sílica gel, carbón activado o zeolitas con una eficiencia entre el 85% - 90%. Sin embargo requiere introducir modificaciones en el diagrama original de plantas existentes, por lo que se recomienda implementarla en instalaciones nuevas.

Mediante la combustión con oxígeno:

El diagrama de flujo azul de la figura 12 consiste en realizar la combustión utilizando O₂ en lugar de aire, observándose una recirculación de los gases de combustión, ricos en CO₂ y agua, para evitar temperaturas de llama excesivamente elevadas.

La separación del O₂ requerido para la combustión, partiendo del aire atmosférico, es una tecnología madura ampliamente empleada en la industria de procesos. Puede realizarse mediante destilación criogénica (requieren unos 200 kWh/ton O₂) o empleando tamices moleculares (zeolitas) que adsorben selectivamente N₂ y lo desorben mediante variaciones de presión en los reactores que los contienen, requiriendo un consumo mínimo de energía; éstos, se recomiendan hasta demandas de 20 ton O₂/día.

Este método permite obtener CO₂ en concentraciones elevadas sometiendo los gases resultantes de la combustión a una simple condensación de vapor de agua, mediante enfriamiento, seguida de una compresión. Las impurezas presentes en el combustible o en el O₂ empleados pueden requerir de una purificación y secado adicionales.

La oxi-combustión puede emplearse para generar vapor en calderas convencionales, alimentar directamente una turbina a gas y evaporar, mediante calentamiento directo, agua presurizada junto con los gases de combustión, a expandir en una turbina. Donde estas últimas requieren emplear diseños de turbina especiales. De este tipo de captación existen proyectos demostrativos en Alemania, Francia y Estados Unidos.

⁶⁹ Raúl R. Prando. La captura y el almacenamiento del dióxido de carbono, CAC. Una herramienta de mitigación del cambio climático. Academia Nacional de Ingeniería, Uruguay. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. Uruguay (2011).

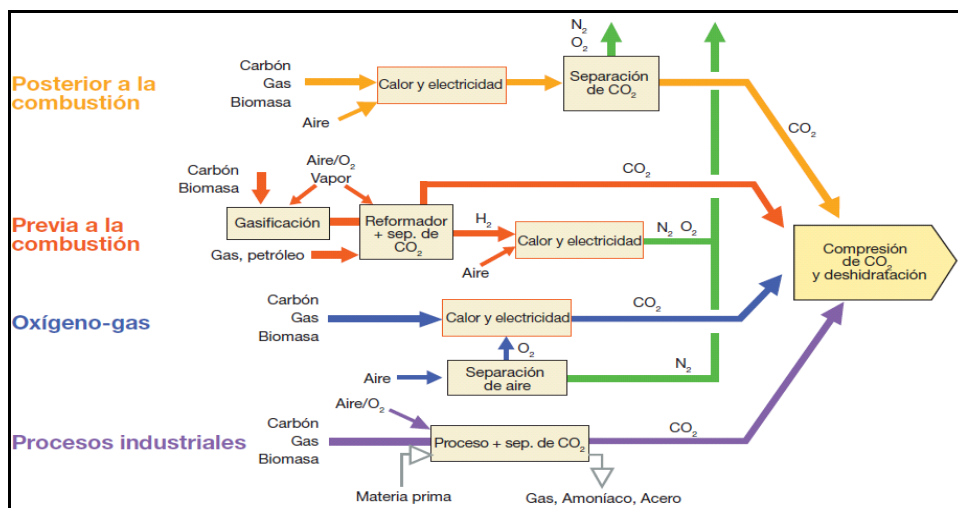
Posterior a la combustión:

Como se evidencia en la figura 12 diagrama de flujo amarillo, la mayor ventaja comparada con las anteriores es que puede ser adaptada a las plantas industriales sin requerir para ello modificaciones internas mayores. Sin embargo, los humos de combustión suelen contener contaminantes tales como NO_x , SO_x , HCl, Hg, y PM, que deben ser controlados adecuada y previamente a la captura del CO_2 .

Este método requiere tratar grandes volúmenes de gases con bajas presión (próxima a la atmosférica) y concentración de CO_2 entre 3% y 15% en unidades de generación de potencia con carbono. Origina costos de inversión elevados (consecuencia de los volúmenes a tratar), operación y mantenimiento importantes (por requerirse la compresión del gas).

Cuando se realiza el proceso de combustión con aire, el CO_2 aparece diluido en los gases que se emiten a la atmósfera debido al gran contenido de nitrógeno que hay en este. La captura del CO_2 tiene por propósito obtenerlo concentrado para así transportarlo y almacenarlo.

Figura 10. Diferentes sistemas de captación de CO_2 disponibles.



Modificado de: Bert Metz et al. Informe especial del IPCC La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2005.

En la industria de gas natural, el proceso de endulzamiento que se realiza es aplicable a la captación de gases posterior a la combustión o en su defecto al vapor generado en la explotación de yacimientos geotérmicos, donde se utilizan diferentes principios físicos y químicos. Existen varios tipos de aminas, las cuales pueden tener propiedades diferentes

entre sí, la selectividad, efectividad y corrosividad del proceso puede ser determinada por el tipo de amina existente, es por esto que es importante determinar su naturaleza química.⁷⁰

En este se usa una torre contactora empacada o con platos, donde se encuentran el gas y la amina en contracorriente, la amina líquida sale por el plato inferior de la torre rica en CO₂ y H₂S, posteriormente la amina es regenerada en la torre despojadora que emplea el calor para revertir las reacciones químicas. La amina regenerada y pobre sale entonces por la parte superior de la torre retornando de nuevo al tanque de almacenamiento y de allí a la torre contactora, para empezar de nuevo el ciclo.

Por otro lado el CO₂ y el H₂S salen por la parte superior de la torre despojadora donde posee un reflujo con el fin de mejorar la eficiencia y separar el agua del gas. En la figura 13 se ilustra el flujo de proceso utilizado en una planta de aminas. Otras metodologías para la captación de CO₂ es el uso de membranas permeables y/o tamiz molecular, sin embargo el más ampliamente usado es el descrito anteriormente como captación por aminas.

Después de la captación, es necesario la compresión y el transporte a través de gasoductos hasta los lugares de almacenamiento o utilización; esta puede ser en formaciones geológicas, en las profundidades oceánicas o en utilidades industriales.

En cuanto a las formaciones geológicas con potencial de almacenamiento de gases ácidos como el CO₂ y H₂S están los yacimientos de petróleo y gas, formaciones salinas profundas, capas de carbón inexplorables y yacimientos geotérmicos.

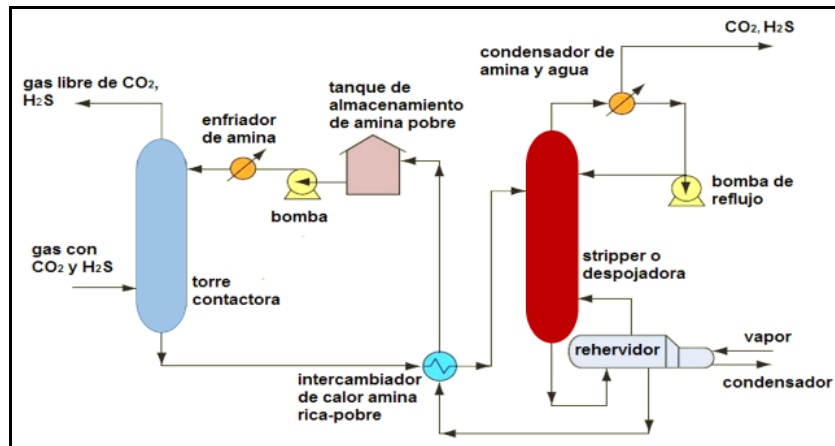
Según la bibliografía la técnica más ampliamente estudiada es el almacenamiento geológico principalmente como procesos de recobro mejorado en explotaciones petroleras (EOR), donde se necesita de una roca sello para su estanqueidad, donde saturara el espacio poroso de la roca, desplazando el hidrocarburo presente en la misma, finalmente queda almacenada por grandes periodos de tiempo, pudiendo con ello retornar al ciclo del carbono.⁷¹ Otra técnica que podría ser de bastante interés es el aprovechamiento de CO₂

⁷⁰ Ken Arnold Volumen 2, 2ª edición (1999).

⁷¹ Bert Metz et al. Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2005).

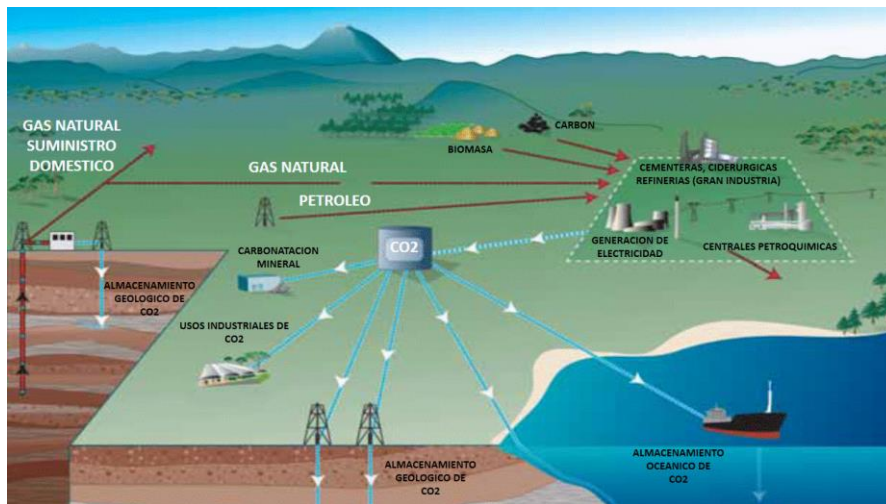
con fines industriales en la fabricación sintética de carbonato de calcio o de magnesio que podría ser utilizado en la construcción.

Figura 11. Flujo de proceso en la recuperación de CO₂ y H₂S con aminas.



Modificado de: Ken Arnold M. Stewart. Surface Production Operations. Volumen 2. Design of Gas-Handling Systems and Facilities (1999).

Figura 12. Diagrama de los posibles sistemas de almacenamiento de CO₂.



Modificado de: Bert Metz et al. Informe especial del IPCC La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2005.

En la figura 14 se visualizan los diferentes métodos que existen para disponer el CO₂ captado industrialmente y que puede ser usado principalmente para almacenamiento geológico, en procesos de recobro mejorado, almacenamiento en las profundidades oceánicas y en usos industriales como la carbonatación mineral.

Agregado a este tipo de investigaciones cabe mencionar el lado pesimista del asunto, que radica en la energía adicional que debe utilizarse para poder realizar la captación, compresión, transporte y almacenamiento de los gases efecto invernadero, lo cual conlleva a un incremento de las emisiones a tratar y un incremento del costo del proyecto; con ello se podría afirmar de manera analógica, que el futuro de las energías es definitivamente las limpias y amigables con el medio ambiente.

3.10. REINYECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO EN FORMACIONES DE INTERÉS ECONÓMICO.

Una opción ambientalmente segura y que quizás también contribuya a la misma generación de energía en cualquiera de las dos industrias, es la reinyección de los fluidos a los yacimientos, donde en la industria de los hidrocarburos desplaza el crudo del pozo inyector al productor y en la industria geotérmica hace que el yacimiento no pierda su capacidad productora debido al reabastecimiento de agua, ya que si el yacimiento no posee una buena recarga se secará y terminará su vida productiva.

Desde este último punto de vista, la inyección de fluidos al yacimiento geotérmico acompañado de la extracción y producción de sustancias y compuestos químicos antes de ser inyectados, es una solución ambiciosa ambientalmente ya que puede incluso captar aguas residuales de otras industrias y del mismo consumo humano para ser inyectadas a los yacimientos geotérmicos para generar energía, constituyendo con ello un ciclo interesante y que verdaderamente aporta al desarrollo medioambiental del planeta. Generando energía y llevando los residuos a un lugar donde no contaminaría.

Para la realización de esta actividad es necesaria la licencia ambiental emitida por las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) sobre la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos. Artículo 9 del decreto 2820 de 2010. Finalmente la inyección de fluidos peligrosos también puede inyectarse a formaciones geológicas estables, las cuales contendrán estos por una gran cantidad de tiempo.⁷²

⁷² López, V. Ana. Instituto Politécnico Nacional; Estudio para disposición final de residuos peligrosos líquidos en formaciones geológicas estables; México; (2007).

En cuanto a la Competencia por el agua para consumo humano y alimenticio, resulta en una ambigüedad absoluta, por un lado la energía es indispensable para producir alimentos, así como también para llevar el agua hasta nuestros hogares ya sea de manera directa con utilización de motobombas y elementos que la potabilizan o de manera indirecta en la fabricación presas y acueductos, también en la parte alimenticia para sacar los alimentos de las zonas rurales y prácticamente en cualquier actividad que realicemos usamos la energía. Pero puede ser esa misma energía la que nos desabastezca del agua que necesitamos para vivir.

El ente regulador debe tener un análisis profundo de este tipo de situaciones, sin embargo no es así por lo menos para Colombia y para la mayoría de países tercermundistas, por consiguiente, es una tarea a la que tienen que apuntarle, pues es absolutamente poco inteligente que un país autorice la exportación de los recursos minero-energéticos y además dañen y acaben con los recursos hídricos.

En este sentido la reinyección de los fluidos producidos es una solución accesible y también la solución planteada donde la utilización de aguas de deshecho urbana para realizar este tipo de captación; cabe anotar que esta tecnología o procedimiento ya se realizó en el proyecto geotérmico de campo los Geysers Islandia donde ha tenido un éxito rotundo.⁷³

3.11. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA SATELITAL.

En cuanto a la actividad exploratoria, la etapa inicial contempla la exploración sísmica y esta a su vez se divide en activa y pasiva; la primera usa explosivos y es la que utiliza la industria de los hidrocarburos y la segunda, la sísmica pasiva utiliza la misma actividad sísmica de la zona y es la empleada en las prospecciones geotérmicas. La sísmica con explosivos es una actividad que está reglamentada en Colombia pero que ha generado gran desilusión ante la comunidad, quizás por falta de conciencia ambiental de las empresas que la desarrollan y de su personal o una laxa, incompetente y no controlada aplicación de los lineamientos que ella misma imparte cuando aprueba las licencias.

⁷³ Alyssa Kagel, Diana Bates, & Karl Gawell. A Guide to Geothermal Energy and the Environment. Geothermal Energy Association, 209 Pennsylvania Avenue SE, Washington, D.C. (2003).

Actualmente la mayoría de las zonas accesibles han sido exploradas y las que han dado resultados positivos ya se encuentran en explotación, es por esto que la industria petrolera tendrá que dar un salto tecnológico que incursione en lugares inaccesible a escala humana tanto en tierra como en el mar.

Estas limitaciones e incertidumbres han comenzado a ser superadas mediante la aplicación de modernas tecnologías de era espacial, que aportan nuevas soluciones para la identificación y localización en alta precisión de recursos energéticos y minerales. Además de los adelantos informáticos y de procesamiento de datos que facilita la modernización de la geofísica donde la tecnología que se usa para identificar la composición mineralógica y geológica de los cuerpos celestes y los planetas se usa ahora para estudiar la Tierra.

En consecuencia, la cantidad de información obtenida por medio de los satélites suministra a los científicos un nuevo instrumento para comprender y analizar los fenómenos que dominan la dinámica terrestre. Después de efectuar muchos ensayos, la agencia espacial europea (ESA) ha señalado recientemente que “la prospección directa, utilizando satélites que recogen e interpretan información geológica ofrece grandes ventajas frente a los métodos convencionales de exploración”. Los científicos del Instituto Espacial de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) en un informe publicado por ScienceDaily señalaron que “los ensayos realizados confirman que los medios satelitales son muy precisos y menos intensivos en el uso de recursos para la ubicación de yacimientos de hidrocarburos que la sísmica tradicional”. Los científicos estiman que esta nueva tecnología está llamada con los años a reemplazar completamente a la sísmica convencional.

3.12. IMPORTACIÓN DE LEYES EN ENERGÍAS RENOVABLES, LICENCIAMIENTO AMBIENTAL Y SEGUIMIENTO A LOS PROYECTOS.

Colombia es un país único en la región, con un conflicto armado en negociación que ha perdurado por más de 30 años, nuestra institucionalidad, legislación, problemáticas locales y realidades sociales, culturales y económicas difieren notablemente de las condiciones y normas aplicadas en los países primermundistas, las comunidades son exigentes y en muchos casos asesorados por los grupos ilegales. La corrupción en las cúpulas políticas

ya puede evidenciarse sin investigaciones profundas y muchos políticos están privados de la libertad o están por judicializar debido a los malos manejos políticos.

Sin embargo los estándares ambientales, las exigencias y la legislación en esta materia son relativamente altos si se compara con países de la región como Ecuador, Chile, Perú y Bolivia. Por ello y por la diversidad natural y minera sería un grave error tratar de implementar políticas importadas desde otras latitudes, sin realizar un análisis detallado para realizar los ajustes necesarios que requiera, así sean un éxito en los países de origen.

Sin duda alguna la responsabilidad tanto individual como empresarial ya sea del ente privado como del público debe ser el pilar fundamental para crear una cultura que incentive el desarrollo de un ambiente sano y además reparador; donde el bien común prime sobre el particular y vislumbre el desarrollo social, cultural, político y económico encaminado hacia la sostenibilidad a largo plazo, pensando en nuestra tierra como un sistema sensible que debe ser valorado y respetado por cada uno como si fuera su propio cuerpo.

Como conclusión se tiene que la institucionalidad debe tener un ente de calidad y control interno, constante, diversificado, robusto y actualizado globalmente que continuamente esté al tanto de las políticas y tendencias mundiales en lo referente a legislación ambiental y como estas pueden ajustarse a las necesidades propias de cada una de las regiones del país, además Colombia tiene grandes posibilidades de ser innovador en este tema ya que posee gran capacidad de talento humano y diversidad natural.

Estudiando el licenciamiento ambiental en Colombia; el Departamento Nacional de Planeación (DNP) ha concluido; quizás, algunos aspectos por emular de las prácticas internacionales exitosas son la planificación del desarrollo inclusivo, participativo, holístico y de largo plazo, no inmediateista; y el manejo total del tema ambiental desde el Estado, incluyendo hasta la realización de las evaluaciones ambientales estratégicas y los diagnósticos ambientales de alternativas. En tal sentido, se sugiere que debería permitirse

una evolución particular en Colombia a partir de su propio desarrollo institucional y cultural, con ´sello colombiano´ y generando herramientas de gestión a partir de la creatividad.⁷⁴

La mala interpretación por parte de los usuarios, que toman la licencia ambiental como un requisito y le quitan importancia de lo que realmente amerita en la puesta en marcha del proyecto referente al plan de manejo ambiental real que se ejecuta.

La etapa de planeación no tiene suficiente cohesión con las etapas de evaluación y seguimiento a los proyectos, falencia que va mucho más allá de la legislación y de los organismos encargados. Pues esta se basa en la información preexistente en las diferentes entidades tanto del estado como de las empresas privadas; la desarticulación entre organismos del estado y la desorganización de las mismas hace de esta primera etapa una demora adicional para la toma de decisiones en el estudio de impactos ambiental, razón por la cual puede quedar incompleto y con información errada. Por esto el estado debe crear o mejorar el SIAC “Sistema de Información Ambiental Colombiano” además del sistema de información del IDEAM, instituto Colombiano de antropología e historia y todas aquellas entidades que puedan estar relacionadas con los proyectos realizados y sus jurisdicciones. Cabe mencionar incluso que en diferentes temas se encuentra más información de nuestros recursos tanto naturales, bióticos, abióticos, minerales y de flora y fauna en empresas privadas y en revistas e investigaciones procedentes de países como Estados Unidos, Japón; China y muchos otros que en los mismos organismos del estado.

La socialización y consulta previa no pueden ser enfrentadas como meros trámites administrativos, sino como expresiones de derechos fundamentales. Las experiencias y los proyectos que hayan resultado positivos deben ponerse de ejemplo y guía para tomar de allí lo mejor y quizás perfeccionarlo sin que ello conlleve a una copia inescrupulosa e irresponsable.

La institucionalidad debe tener un personal idóneo, transparente y suficiente para llevar a cabo tanto un acompañamiento en la planeación, como en la evaluación del estudio de impacto ambiental y el seguimiento al plan de manejo ambiental.

⁷⁴ DNP; evaluación de operaciones al proceso de licenciamiento ambiental en sus etapas de planeación, evaluación y seguimiento, desarrollados por las entidades encargadas del sector, los peticionarios y las autoridades ambientales; informe final ard-426-doc. 12; Bogotá D.C. (2013).

La etapa de seguimiento es insuficiente en cuanto a la participación de otras autoridades ambientales para realizar el seguimiento de los proyectos, cuando la licencia es otorgada por ANLA. La retroalimentación que hace el organismo encargado del seguimiento es escaso o nulo y no muestra los impactos o buenas prácticas ejercidas por los planes de manejo ambiental.

Es engorroso y demorado el acto administrativo por el cual la licencia puede derogarse debido al incumplimiento de la misma, razón por la cual el beneficiario puede gozar de ella aun en incumplimiento de la misma hasta tanto el proceso sancionatorio no quede en firme. Pudiendo establecerse que la licencia quede detenida hasta tanto no se contravenga los puntos incumplidos y/o se establezca un seguimiento directo para su solución, la cual deba ser inmediata para no paralizar las actividades. Podría implementarse una figura similar a las auditorías que agilice la comunicación de los hallazgos y el acuerdo de las medidas correctivas, sin perjuicio de que la autoridad pueda emitir autos en los cuales realice requerimientos adicionales.

Licenciamiento analógico en el contexto mundial:

Destacan casos que merezcan ser inspeccionados en Colombia, concerniente a fragmentos o aspectos de la política ambiental de otros países en temas concretos como son: España; la regulación de aguas que adopta, Estados Unidos; la regulación para especies en vía de extinción, y la existencia de una zonificación nacional que orienta a los inversionistas en cuanto al uso aprobado en determinado territorio, facilitando la planeación de los proyectos.

En Canadá por ejemplo existe la modalidad de licencia rápida (incluso en 21 días) lo cual es posible por lo siguiente: la exactitud con la cual se realizan los proyectos, la disponibilidad de información veraz, actualizada y sistematizada disponible fácilmente a través de plataformas del estado, una definición exacta de los usos del territorio por sector productivo, existencia de una ventanilla única gubernamental para atender a los usuarios interesados, disponibilidad de guías detalladas para cada tipo de proyecto, obra o actividad a licenciar y el seguimiento estricto de los proyectos licenciados con aplicación de la sanción ante cualquier incumplimiento. Estados Unidos es un país similar donde no hay licencia como tal, pero si existe PMA y su estricto seguimiento por parte del estado.

Sin embargo también se dan contravenciones con la población debido a discrepancias entre beneficios económicos versus los impactos negativos.

De Noruega, la industria petrolera costa afuera, en el Mar del Norte, con una industria pesquera muy desarrollada, lo que desenlaza una discusión energético-ambiental que han enfrentado mediante la conciliación. En esa dirección, el control ambiental del Estado es muy inflexible, cuenta con unos parámetros bases organizados y completos (con una biodiversidad marina perfectamente inventariada), saben con claridad en dónde y en qué periodos se puede hacer exploración de hidrocarburos, bajo qué circunstancias de seguridad ambiental se deben desarrollar esas actividades, y cuentan con un sistema organizado de monitoreo y alarmas para evitar derrames o contaminación. Todos estos elementos han llevado a tener una industria segura desde el punto de vista ambiental en una zona muy sensible ambientalmente, soportado por un Estado con alto nivel de representatividad, con una información precisa y respaldado por una completa normatividad que indica la suspensión ante el más mínimo incumplimiento.

En países latinoamericanos, como Guatemala, identifican el caso donde se aplica el silencio administrativo positivo, es decir, cuando el peticionario entrega el estudio de impacto ambiental y la autoridad no se manifiesta en el plazo establecido (90 días) se interpreta como otorgada la licencia ambiental al proyecto. En Ecuador reconocen una flexibilización de la normatividad para el licenciamiento ambiental y más laxo en la aplicación, lo cual probablemente resulte del hecho de que en la fase inicial del licenciamiento se exige información con un cierto nivel de detalle, que va profundizándose a medida que el trámite avanza; y destacan el énfasis dado al seguimiento de los proyectos.

De Panamá se resalta la exigencia de la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM) para los asesores de estar en el registro de autorizados para firmar estudios ambientales⁷⁵, caso que también se da en México, del cual subrayan la importancia que ese proceso sea transparente para no convertir los registros en unos círculos de favoritismo. En Perú y Chile están intentando innovar, al establecer desde el Estado una previa viabilidad de los proyectos que requiere el país para su desarrollo; ello exige una coordinación anticipada

⁷⁵ DNP; evaluación de operaciones al proceso de licenciamiento ambiental en sus etapas de planeación, evaluación y seguimiento, desarrollados por las entidades encargadas del sector, los peticionarios y las autoridades ambientales; informe final ard-426-doc. 12; Bogotá D.C. (2013).

de los Ministerios para ofertar entre los inversionistas privados los proyectos más relevantes de los sectores hidrocarburos, minería y energía, principalmente; incluso, el estado peruano está realizando directamente los procesos de consulta previa, pues pareciera que están reconociendo como un elemento no tan exitoso el manejo sectorial pasado de los temas sociales y ambientales, que generó profundos problemas y enfrentó a industria y comunidad, aun perteneciendo al mismo Estado, por diferencias conceptuales.

De Chile, destaca la disponibilidad total de la información relacionada con los proyectos en proceso de licenciamiento ambiental en la página web del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA); sin embargo, resaltan diferencias grandes del sistema chileno y peruano con el colombiano: en el país meridional la licencia se da si se cumplen todos los requisitos de licencia, y en Perú las licencias no están centralizadas en la autoridad ambiental, sino delegadas a los ministerios sectoriales.

De Francia, subrayan la eficacia de la política en materia de arqueología, la cual es de carácter público y por ende las operaciones son realizadas por funcionarios del Estado; de México destacan los planes de arqueología preventiva realizados directamente por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), ya que la planta de personal estatal es robusta y con mejores condiciones para los programas de seguimiento arqueológico.

España tiene la Autorización Ambiental Integrada (AAI) y cada comunidad autónoma tiene un sistema específico para las licencias, por ejemplo para la intervención en patrimonio arqueológico; en efecto se tiene una legislación en cada división territorial (comparable a un departamento colombiano), lo que pudiera conllevar a un mayor conocimiento y a un mayor control sobre los planes específicos.

La Asociación Internacional de Evaluación de Impactos (IAIA) usa dos factores; el factor 10 y factor 4 que se viene aplicado en países Europeos y relacionados con la desmaterialización en las industrias y la eficiencia ecológica, liderada por Alemania. El factor 4 se refiere a la proporción de la eficiencia ecológica, que propone reducir cuatro veces el uso de la naturaleza por cada unidad de bienestar, y también plantea reducir a la mitad el uso de la naturaleza y doblar el bienestar global. El factor 10 induce a la reducción absoluta en el uso de la naturaleza por un factor de 10 en las economías industrializadas; también persigue multiplicar por 10 los recursos de la eficiencia en las economías

desarrolladas, mientras se reduce el uso total de los recursos naturales, acorde con los límites que marca la capacidad de carga.⁷⁶

Con todo lo anteriormente mencionado podrá adoptarse de alguna manera particular y ajustada acorde con las condiciones ambientales, políticas, económicas y sociales propias de Colombia algunos de los lineamientos mencionados que siempre apunten al mejoramiento y robustez de las licencias ambientales y su seguimiento en su etapa de operación en los planes de manejo ambiental. Sin duda alguna es necesario un seguimiento que cree la cultura de sostenibilidad y sensibilice a las industrias y principalmente a las personas que trabajan en ella, como actores directos con conciencia ambiental. Además de una concertada participación comunitaria que sirva de ente regulador y así retroalimentar el sistema en aras de la búsqueda de soluciones pacíficas, puntuales y rápidas a los problemas ambientales que puedan presentarse y sobre todo la prevención de los mismos.

Leyes para las energías renovables en América Latina y el mundo.

Los países europeos van al frente en cuanto a legislaciones a favor de las energías renovables. En los EE.UU. esto ha sido inconsistente a lo largo de muchos años. En muchos países en desarrollo, existe aún una enorme disparidad política y no reina estabilidad y confiabilidad en las legislaciones, combinado esto con la carencia de recursos financieros.

América Latina no se ubica entre las regiones donde las legislaciones de apoyo a las energías renovables representan una prioridad; no obstante, ya varios países han comprendido la importancia de estas gestiones, han incorporado en sus leyes regulaciones dirigidas a incentivar las fuentes renovables de energía, que han influido en los resultados en cuanto a la introducción de las energías renovables en esos territorios.

Los países de América Latina y el Caribe, cuentan con abundantes recursos en energías renovables (mucho más que de combustibles fósiles en la mayoría de ellos), y con recursos humanos con la capacidad necesaria para desarrollar proyectos de investigación y desarrollo. Ello permitiría la apropiación y aplicación de las tecnologías energéticas renovables requeridas, así como el fortalecimiento de la industria nacional.

⁷⁶ Departamento Nacional de planeación. (2013).

Ante la situación energética actual, la dependencia de los hidrocarburos y la generación de gases efecto invernadero es lo que predomina. Se requiere un cambio de paradigma energético, reevaluando el modelo de desarrollo. La introducción de las fuentes renovables de energía para la solución de este problema, es un factor fundamental.

En la tabla 7 se muestra una cronología en la implementación legislativa del mundo en energías renovables. En el siglo XXI, el apoyo político ya se perfila en varios países de América Latina y el Caribe, como lo vienen haciendo el continente europeo y otras regiones. Esto se ha visto concretado en leyes y regulaciones que persiguen como objetivo borrar la marginalidad en que se encuentran las energías renovables, por efecto de las distorsiones en el mercado energético. La toma de conciencia sobre la necesidad de apoyos políticos en forma de leyes y regulaciones ya aparece en varios países de nuestro continente, con más desarrollo en Argentina, Brasil y México, y en otros sin los mismos niveles de desarrollo, como El Salvador, Nicaragua y República Dominicana.

Tabla 7. Línea de tiempo de las leyes de las energías renovables.

Cronología de las leyes a favor de las energías renovables		
Algo que confirma cómo el mundo ha identificado la necesidad de leyes a de las energías renovables, es que más de sesenta países tienen alguna ley para la promoción de la generación de potencia con energías renovables; además, aquellos países con mayor potencia instalada de tecnologías de las fuentes renovables de energía han promulgado alguna ley al respecto. Son diferentes las variantes de leyes que se han aplicado en cuanto a la forma de operar. El tipo más común es la conocida como de tarifas fijas y predefinidas (Feed-in tariff y Feed-in law, en Inglés). Existen, además, los sistemas de cuotas o normas de cartera de renovables, subsidio a la inversión, los créditos fiscales a la inversión, impuestos a la venta o a la energía, las licitaciones públicas, los certificados verdes negociables y sistemas de prima fija, entre otros. La primera ley de apoyo a las energías renovables fue del tipo de Feed-in tariff, creada y aplicada en los EE.UU.; le	Grecia, India, Italia, España y Suiza, en los principios de los años 90. De los países del ALBA	
	Ecuador, Nicaragua y Bolivia son los que aplican leyes pro energías renovables	
	Año	Países/estados/provincias
	1978	Estados Unidos
	1990	Alemania
	1991	Suiza
	1992	Italia
	1993	Dinamarca, India
	1994	España, Grecia, Costa Rica
	1997	Sri Lanka
1998	Suecia	
1999	Portugal, Eslovenia, Noruega	
2000	Tailandia	
2001	Francia, Letonia, Colombia	
2002	Argelia, Austria, Brasil, República	
2004	Italia, Israel, Nicaragua, Isla del Príncipe Eduardo (Canadá), Andhra Pradesh y Madhya Pradesh (India), Chile	
2005	Turquía, Washington (EE.UU.), Irlanda, China, India (Karnataka, Uttaranchal, Uttar Pradesh),	

siguieron Alemania, Dinamarca,	2006	Ontario (Canadá), Tailandia
	2007	República Dominicana, Ecuador, El Salvador, Sur
	2008	México, Perú, Uruguay
	2009	Argentina
	2014	Colombia

Modificado de: Conrado Moreno Figueredo. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), La Habana, Cuba. Leyes para las energías renovables en América Latina y el Caribe.

Estas leyes, aunque diferentes en cada uno de los países, ya que han sido adaptadas a las condiciones de cada uno, indican que sus gobiernos han comprendido que sin los apoyos políticos y financieros a las fuentes renovables de energía, la dependencia de los hidrocarburos seguirá caracterizando a nuestra región, y continuarán en situación desventajosa con respecto a los subsidiados combustibles fósiles y nucleares.⁷⁷

3.13. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS.

La reducción del consumo energético a nivel industrial y doméstico está relacionado con dos grandes aspectos; el primero con la eficiencia energética o de los procesos y la segunda con la contribución en la reducción de los efectos perjudiciales al medio ambiente. En esa dirección la energía geotérmica y la industria petrolera se complementan de alguna manera, creando con ello una retroalimentación entre ambas no solo desde el punto de vista ambiental, sino también tecnológico.

En la revisión de la literatura se encontró la utilización de desechos de una industria pueden ser útiles para la otra y viceversa, ahorrando energía y buscando una optimización y una mejor administración de los recursos. Esperemos que las grandes potencias industriales permitan el desarrollo de tecnologías que permitan el desarrollo y bienestar de las naciones y del medio ambiente.

3.13.1. Recobro mejorado de petróleo basado en el aprovechamiento de yacimientos de energía geotérmica con la utilización de pozos abandonados de la industria de hidrocarburos en Colombia. Si tenemos en cuenta que un proyecto de recuperación

⁷⁷ Conrado Moreno Figueredo. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), La Habana, Cuba. Leyes para las energías renovables en América Latina y el Caribe.

terciaria de petróleo basada en la inyección de vapor puede ser viable o no dependiendo del costo de producirlo, transportarlo e inyectarlo, se tienen grandes expectativas que se pueda aprovechar el calor existente en las entrañas de la tierra para los yacimientos de crudo pesado que no tienen suficiente temperatura, su viscosidad es alta y por lo tanto la producción natural o primaria puede verse comprometida. Así como también para la producción de energía eléctrica para el mismo campo. De esta manera vemos como dos industrias que explotan el subsuelo, pero que explotan fluidos diferentes pueden integrarse para un bien común “la producción de energía”.

Al comienzo de esta investigación se había propuesto la utilización de fuentes geotermales con objetivos industriales; es decir la utilización de agua y/o vapor de plantas geotérmicas que se construyeran en los diferentes lugares del país para la utilización en campos petroleros con el fin de desarrollar proyectos de recobro mejorado de petróleo. Sin embargo sin ni siquiera hacer análisis financieros se puede discrepar que este tipo de tecnología se obtendría con una operatividad relativamente costosa, pues las plantas geotérmicas que con mejores resultados sean instaladas estarán ubicadas en los alrededores de los volcanes más importantes como el nevado del Ruiz, los nevados de Chiles y Cerro Negro, Paipa, Galeras, en la Sierra Nevada de Santa Marta entre otros lugares. Por lo tanto el transporte desde las plantas geotérmicas hasta los yacimientos de hidrocarburos resultaría en una fuga no solo de capital sino de calor que pone en riesgo el desarrollo de los mismos más aun con un crudo a los precios actuales.

La industria del petróleo y la industria geotérmica están produciendo hoy lo máximo que pueden a escala mundial, al mismo tiempo la longevidad o sostenibilidad de este auge es preocupante. En la industria del petróleo, gran cantidad de pozos han sido abandonados o lo serán en un futuro no muy lejano. Revisando la bibliografía a nivel mundial se ha encontrado que hay algunas ideas y/o metodologías para la utilización de un recurso importante que queda después del agotamiento de hidrocarburos comercialmente.

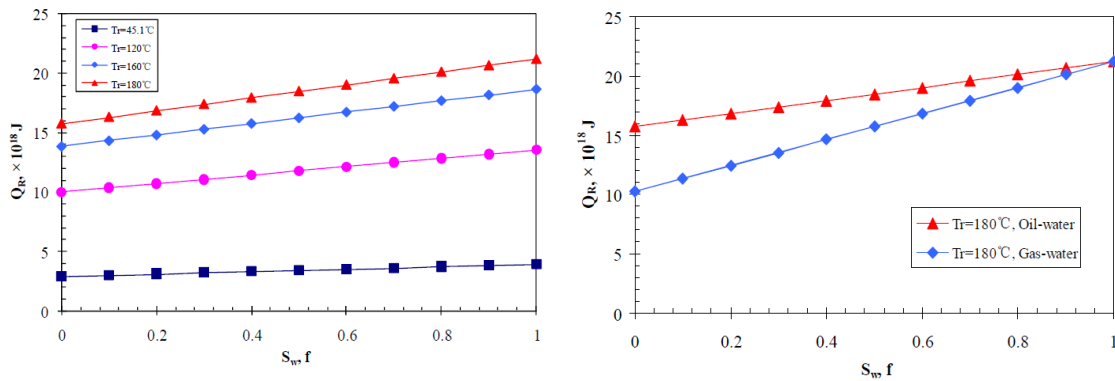
Según algunos estudios importantes, cabe la posibilidad técnica y económica de transferir algunos de estos yacimientos abandonados a los reservorios mejorados de energía geotérmica, después de la inyección de aire, ya que esta puede incrementar la temperatura por la reacción de oxidación que se genera con la presencia de hidrocarburos en su interior, resultando con ello una elevada temperatura de las formaciones de interés.

Y con ello establecer un aprovechamiento geotérmico para generar energía eléctrica o el aprovechamiento del calor para campos cercanos o de diferentes formaciones.⁷⁸

Cuando un pozo petrolero llega a su límite económico, termina su vida productiva con el abandono. En todo el mundo es casi incalculable la cantidad de pozos abandonados; en costa afuera entre 2000 y 2010 la cantidad de pozos abandonados se calcula en 27000 pozos de 4900 plataformas.⁷⁹

En la figura 15 se muestran los resultados de un artículo de Lingyu Zhang, at el (2009). Según este estudio; en cuanto a las propiedades de los fluidos, la cantidad de energía está en función de la temperatura o del gradiente geotérmico, la saturación de crudo, agua y gas que puedan contener las formaciones y de las propiedades petrofísicas de las mismas, pues entre más saturación de agua es mayor la energía que se puede recuperar y esta se ve afectada con la saturación de crudo y gas, sin embargo es más afectada por la saturación de gas.⁸⁰

Figura 13. Efecto de la saturación de los fluidos del yacimiento de crudo y gas para la recuperación de energía geotermal.



Tomado de: SPE 120031.

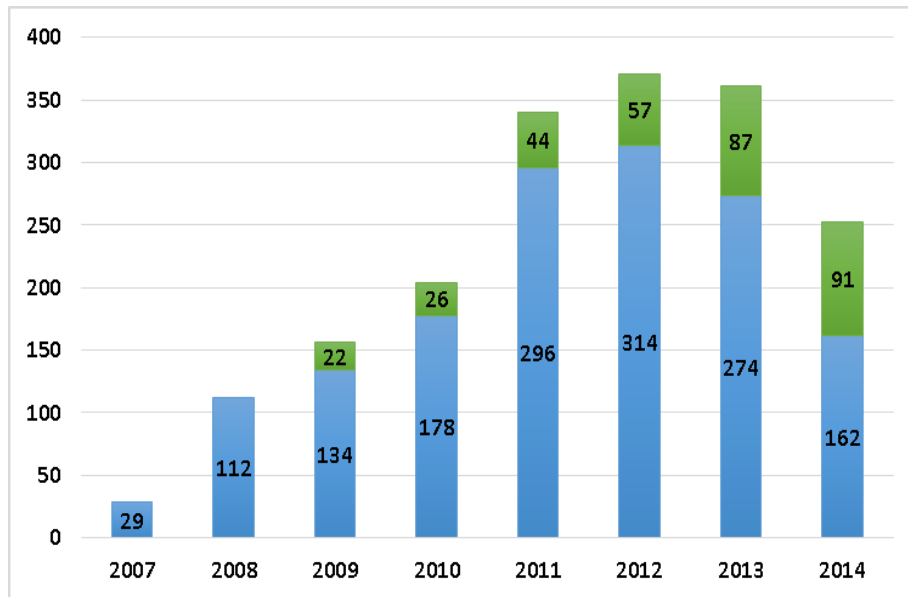
⁷⁸ SPE 46th Annual Fall Meeting, New Orleans, Oct. 3-6 (2008).

⁷⁹ SPE 115055 Energy from Abandoned Oil and Gas Reservoirs (2008).

⁸⁰ Lingyu Zhang, at el. SPE Western Regional Meeting held in San Jose. Estimation of Geothermal Reserves in Oil and Gas Reservoirs. 2009.

En la figura 16 puede observarse el comportamiento histórico del abandono técnico de pozos de producción, discriminado por operación directa de Ecopetrol y por aliados.⁸¹ Esto evidencia el potencial que existe y un capital que puede renacer.

Figura 14. Abandono técnico de pozos de producción de Ecopetrol por operación directa y socios.



Modificado de: Ecopetrol. Reporte integrado de gestión sostenible. Abandono, desmantelamiento y recuperación de pozos. (2015).

Cabe retomar que si los yacimientos o plantas de energía geotérmica de alta entalpia se ubican estratégicamente es recomendable realizar los estudios pertinentes para ser utilizados estos en el recobro mejorado de petróleo.

3.13.2. Hidrógeno la energía del futuro. Todas las acciones humanas individuales o colectivas requieren de energía y recursos. La humanidad apenas está comenzando a tener en cuenta el impacto salvaje y de depredación del medio ambiente y de su actual

⁸¹ Tomado de: Ecopetrol. Reporte integrado de gestión sostenible. Abandono, desmantelamiento y recuperación de pozos. (2015).

contaminación justificada por una “economía global y de desarrollo sostenible” donde el consumo desmedido de los recursos es la premisa de toda la industria en crecimiento.

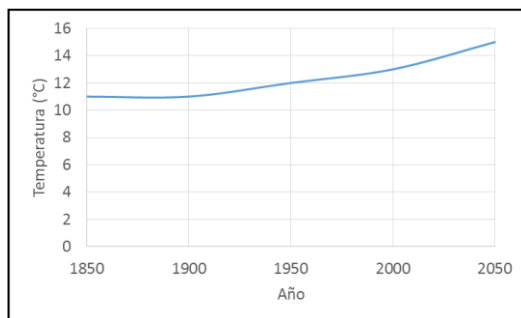
El planeta tierra es un sistema cerrado y hay que tener conciencia de ello; por lo tanto no puede crecer indefinidamente, este sistema tiene restricciones y los recursos se van agotando. Por tanto si la conciencia medioambiental no se enfoca hacia la sostenibilidad y no hacia el desarrollo sostenible, el fin de la vida en el planeta será un tema que puede verse cuestionado en el “largo plazo”.

En el siglo antepasado cuando apenas se comenzaban a utilizar las fuentes energéticas actuales, era inimaginable que estas se acabaran, sin embargo hoy es bien sabido que la energía como es concebida hasta la actualidad se agota. Además de ello no se contaba que en el proceso de consumir estas fuentes de energía impurificaríamos de tal manera el planeta y se dispondría de ellos tan inadecuadamente generando los impactos que se muestran en la tabla 8; el acceso barato e indiferente de la energía “inagotable” le ha hecho creer a la humanidad que tiene ciertos derechos.⁸²

Tabla 8. Impactos ambientales del desarrollo humano.

PROBLEMAS DEL MEDIO AMBIENTE EN EL MUNDO	
El cambio climático	El agotamiento y contaminación de los recursos hídricos
El efecto invernadero	La acidificación del suelo y el agua
El agujero de la capa de ozono	La deforestación y desertificación
La contaminación de las aguas	Los residuos agrícolas y ganaderos
Los residuos urbanos	La contaminación de los suelos
Los residuos industriales	El deterioro del medio natural
Los residuos sanitarios	La pérdida de la biodiversidad

Figura 15. Incremento de la temperatura media terrestre con extrapolación a 2050.



Modificado de: — BROVN, L. ET AL. *La situación en el mundo*. Barcelona, Apóstrofe. 2011.

⁸² Américo p. Hernan et. al. Hidrógeno, combustible del futuro: ¿Por qué, cómo y dónde?. Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica (2011).

Con base a lo anterior la temperatura media de la tierra ha venido incrementándose cada vez a una tasa mayor según se evidencia en la figura 17 y por lo tanto la sociedad mundial se ve obligada a buscar nuevas fuentes de energía y mejore la eficiencia de los procesos, además de tener que cambiar la filosofía de algunas de las actividades en cuanto desarrollo se refiere; como el sueño americano o el bienestar individual e instantáneo en paralelo con el comunitario y de sostenibilidad, dejando el consumismo desmedido que se impulsa todavía como fundamento de la economía.

Es por esto que las energías alternativas comienzan a jugar un importante papel en la canasta energética. Desde el siglo XVII se comenzaron investigaciones acerca del hidrógeno, sin embargo estamos todavía en una etapa temprana de su utilización.

El hidrógeno es representado en la tabla periódica por el símbolo H y con número atómico 1. En condiciones naturales se encuentra como H₂, insípido, no tóxico, no contaminante, no corrosivo, no cancerígeno, no radiactivo, inodoro, incoloro, no metálico y se caracteriza por ser altamente inflamable, tiene una masa atómica de 1,00794, por lo tanto es el elemento más ligero y el más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo. Tiene una gravedad específica de 0.0899 por lo tanto el aire es 14,4 veces más pesado, el punto de ebullición es de 20.27°K (-252.88°C) y su punto de fusión a 14,02°k (259.13°C).⁸³ otras propiedades físico químicas como el poder calorífico inferior y superior, el límite de explosión y detonación, el coeficiente de difusión y el factor de compresibilidad son mostrados en la tabla 9 y se evidencia la gran cantidad de energía que por unidad de masa posee.

Tabla 9. Propiedades del hidrógeno.

propiedades físico químicas del H			
Poder calorífico inferior	120MJ/kg	Capacidad calórica específica	CP=14.199 J/kg-° K
Poder calorífico superior	141.86MJ/kg		CV=10.074 J/kg-°K
Límite de explosión	4.0 – 75.0%	Coeficiente de difusión	0.61cm ² /s
Límite de detonación	18.3 – 59.0%	Factores de compresibilidad	1 a 1 bar, 1.13 a 200 bar

Tomado de: Linares H. José I. y Moratilla S Beatriz Y. Instituto de la energía de España. Colección: avances de ingeniería. Análisis situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas. El hidrógeno y la energía (2007).

⁸³ Linares H. José I. y Moratilla S Beatriz Y. Instituto de la energía de España. Colección: avances de ingeniería. Análisis situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas. El hidrógeno y la energía (2007).

No puede decirse que el hidrógeno sea una fuente de energía, pues no directamente; es necesario disociarlo de algún compuesto químico que lo contenga como el agua o los hidrocarburos entre otros. Se puede encontrar asociado como compuesto con la mayoría de los elementos. Existen en la naturaleza tres isotopos: protio con una abundancia del 99.98% tiene un solo protón y ningún neutrón, el deuterio que posee un protón y un neutrón; representa el 0.0026% naturalmente y el tritio con un protón y dos neutrones es radiactivo y se desintegra en helio-3 a través de una emisión beta.

Hidrógeno como combustible.

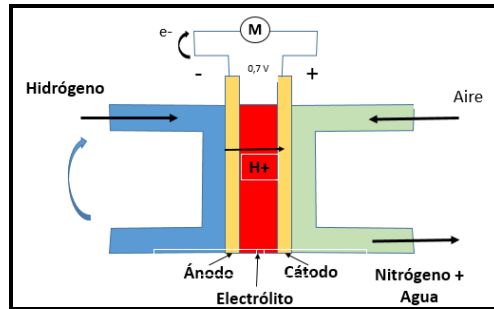
Los motores de vehículos y de la industria en general pueden ser acondicionados para utilizar hidrógeno como combustible con muy pocos cambios en la tecnología del motor convencional. Como ya se ha visto, quemar hidrógeno solo produce agua.

Tiene una alta velocidad de llama, además presenta alta temperatura de detonación, y necesita menos energía para su ignición que la gasolina. Sin embargo, a pesar de todas estas ventajas sobre los combustibles falta un largo camino para el desarrollo de la producción y la infraestructura de distribución a gran escala.

Otra utilización ampliamente investigada y poco difundida son las celdas de combustible que utilizan el hidrógeno y el aire para producir electricidad figura 18, esta electricidad es usada para el funcionamiento de servomotores eléctricos en cada una de las llantas del automotor Y el producto de deshecho es agua 100%. El Hydrogen Fuel Cell Institute ha estimado que, con las celdas de H₂, la energía eléctrica debería costar 5 centavos de dólar por kW/h. El gobierno norteamericano ha financiado programas de desarrollo de celdas para vehículos. La Unión Europea adoptó el H₂ como uno de sus puntos focales. Las empresas productoras de celdas (Daimler-Chrysler, Toshiba, International Fuel Cells, Plug, Ballard, etc.) se están aliando para masivamente comercializar celdas fijas para centros comerciales y viviendas.⁸⁴

⁸⁴ Visintin A. Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas- INIFTA, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. hidrógeno, combustible del futuro: ¿por qué, cómo y dónde? (2011).

Figura 16. Esquema de una célula de combustible de hidrógeno.



Si se produce de forma racional el hidrógeno, a partir de energías renovables; geotérmica, eólica, solar fotovoltaica, carbón o hidrocarburos con captura y reconversión de CO₂, o energía nuclear, puede constituir una buena contribución a la solución del problema energético y ambiental, la economía no se basaría en el hidrógeno, sino que lo haría en las fuentes primarias antes mencionadas incluyendo los hidrocarburos, dando nuevamente como solución al problema energético una mezcla razonable de varias fuentes energéticas.

El hidrógeno es producido industrialmente a partir de hidrocarburos como, por ejemplo, el metano. La mayor parte del hidrógeno elemental se obtiene "in situ", es decir, en el lugar y en el momento en el que se necesita, ello debido a sus particulares características. El hidrógeno puede obtenerse por el proceso de electrolisis a partir del agua, sin embargo, el reformado con vapor (steam reforming) de gas metano es más económico.⁸⁵

En la actualidad se produce bajo los porcentajes y cantidades mostradas en la tabla 10.

Tabla 10. Producción de hidrógeno por fuente.

Fuente	Cantidad en billones de m3 por año	Porcentaje
Gas natural	240	48
Petróleo	150	30
Carbón	90	18
Electrólisis	20	4
Total	500	100

⁸⁵ Linares H. José I. y Moratilla S Beatriz Y. Instituto de la energía de España. Colección: avances de ingeniería. Análisis situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas. El hidrógeno y la energía (2007).

Uno de los inconvenientes más grandes que tiene la electrólisis, es el consumo de energía eléctrica, sin embargo es uno de los métodos más fáciles y sencillos, además también por la abundancia del electrolito (agua). Por esta razón sería interesante investigar y buscar métodos para reducir el costo de la electricidad. Como muestra de ello en Finlandia se utiliza la energía geotérmica como una fuente de electricidad a costos muy reducidos e “inagotables”. Otro ejemplo de una tecnología es utilizar la electricidad obtenida de generadores eólicos para producir hidrógeno por electrólisis.

Tabla 11. Comparación entre combustibles: hidrógeno, gasolina y metano.

Característica / Combustible	unidad	H ₂	C ₈ H ₁₈	CH ₄
Poder calorífico inferior	(kJ/gr)	120	43	50
Densidad gas (kg/Nm ³)	(kg/Nm ³)	0,09	N/A	72
Densidad energética gas	(MJ/Nm ³)	10,8	N/A	35,8
Densidad líquido	(kg/l)	0,07	1 0	73
Densidad energética líq.	(MJ/Nm ³)	10	8	31,5
Límites de inflamabilidad	(%)	4-75	1-8.	5-15
Límites de detonación	(%)	18-59	1-3.	41791,00
Mínima energía de activación	(mJ)	0,02	0,24	0,29
Temp. de comb. espontánea	(°K)	858	600	813
Emisiones	(mg CO ₂ /kJ)	0	80	55
Visibilidad de la llama	si/no	no	si	si
Toxicidad (combustible y emisiones)	si/no	no/no	si/si	si/si

Modificado de: Peretti, A. et. al. Hidrógeno, combustible del futuro. Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica. 2011.

Con respecto a la tabla 11 las características propias y en comparación con combustibles como la gasolina, el diésel, el propano y el gas natural o metano pueden identificarse ventajas y desventajas.

Ventajas:

- ✓ Su densidad energética es tres veces superior a la de la gasolina.
- ✓ El producto de su combustión es agua, por lo tanto no contamina (no CO₂).
- ✓ No contamina el aceite del motor.
- ✓ No crea ni depósitos ni incrustaciones dentro del motor.
- ✓ Baja energía de activación.
- ✓ Extremadamente volátil.
- ✓ No tóxico.

- ✓ Alto límite de inflamabilidad y de detonación.
- ✓ Alta temperatura de combustión espontánea.
- ✓ Muy seguro en espacios abiertos.
- ✓ Las modificaciones a efectuar en los motores convencionales para adaptarlos al hidrógeno son mínimas.

Desventajas:

- ✓ Baja densidad energética (Energía/Volumen) requiere tanques contenedores grandes y pesados.
- ✓ Transporte y almacenamiento costosos y de implementación compleja.
- ✓ Baja temperatura de licuefacción.
- ✓ Baja energía de activación
- ✓ Extremadamente volátil
- ✓ Menos seguro en espacios confinados
- ✓ Combustible secundario: se debe consumir energía para conseguirlo a partir de las distintas materias primas (agua, biomasa, combustibles fósiles) ya que no existe en estado elemental (pero tampoco la gasolina, el gasóleo, el combustible nuclear, etc.).

En vista de que el hidrógeno se vislumbra como la fuente energética del futuro, un gran número de investigaciones se han realizado para analizar su producción y usos, sin embargo aún se tienen algunas limitaciones que impiden su masificación, todo esto a pesar del inminente conocimiento del detrimento medioambiental de los combustibles fósiles, esta situación obligan a la sociedad a un cambio en la mentalidad política, industrial y ciudadana.

Políticamente, algunos avances se han hecho; Estados Unidos lleva desde mayo de 2001 estudiando y analizando políticas concernientes a las posibilidades de desarrollo del hidrógeno. En el 2002 se inicia el programa Freedom-CAR como un consorcio entre el Departamento de Energía norteamericano (DOE) y las principales empresas del sector para lanzar los carros de hidrógeno. Un año más tarde, en 2003, el programa se ve

refrendado pero ampliado a través de la Iniciativa Presidencial para el hidrógeno, en la que se lanza además el proyecto FUTURE GEN, destinado a producir hidrógeno a partir de la gasificación de carbón integrada en ciclo combinado con captura de CO₂.

Uno de los proyectos políticos más ambiciosos referentes al tema en mención es la economía del hidrógeno, resumidamente es un modelo alternativo al realizado actualmente con los combustibles fósiles y por lo tanto se ha propuesto como sustituto del mismo. Las empresas automotrices han apostado por esta economía enfocando al desarrollo e investigación con apoyo gubernamental y asociativo.⁸⁶

3.13.3. Eficiencia energética. Si continuamos con la misma perspectiva del futuro del hidrógeno, podemos establecer que la investigación esté enfocada en la eficiencia que deban tener estos motores y vehículos ya sean de combustión interna o celda de combustible con motores eléctricos. Mientras tanto y todo ello llega tendremos que mejorar la eficiencia energética del transporte y de la industria, lo cual ayudaría a evitar grandes consumos de energía innecesarios.

Con precios del petróleo bajos, como los actuales, los campos petroleros y las industrias de refinación entre otras relacionadas, transporte por ejemplo deben entrar en austeridad y por lo tanto es probable que se desacelere su crecimiento. Por ello es fundamental la existencia de proyectos permanentes en ahorro de energía, eficiencia de los procesos y optimización de la confiabilidad eléctrica y mecánica de las maquinas que se usan.

También es sabio dentro de la industria petrolera, usar y optimizar el gas que se quema en las teas, así como la implementación de energías alternativas, que como ejemplo Ecopetrol viene desarrollando el uso de celdas fotovoltaicas para el suministro de energía en cuartos de control de las casetas de bombeo electro- sumergible y de cavidades progresivas entre otras, pero pensando en su uso masivo debe incentivarse su utilización y desarrollo.

⁸⁶ Jeremy Rifkin. La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra. Barcelona: Editorial Paidós (2002).

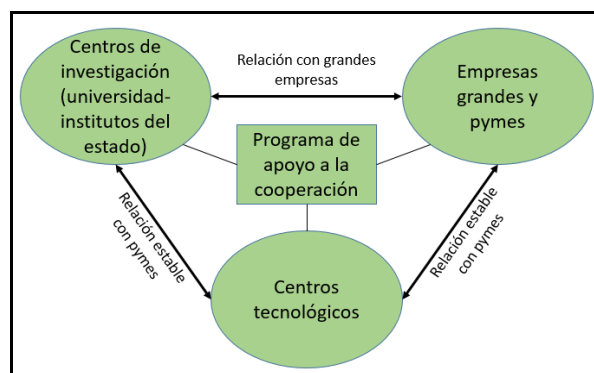
4. OPORTUNIDADES PARA IMPLEMENTAR TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA ENTRE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA Y DE LOS HIDROCARBUROS EN COLOMBIA A TRAVÉS DE LA MATRIZ DOFA

En este capítulo se establecerán las oportunidades que la industria puede tener para realizar transferencia de tecnología a través de un análisis individual de cada una de las propuestas dadas hasta ahora, mediante la herramienta o matriz DOFA; la cual establece tanto factores internos (debilidades y fortalezas) como, externos (oportunidades y amenazas). Existen lineamientos que pueden estudiarse desde el interior de las industrias, y algunas otras son más generales y por lo tanto debe ser revisada desde una perspectiva del estado. Para el buen entendimiento de este capítulo preliminarmente se definen algunas definiciones:

Transferencia de tecnología: Se trata de un proceso de transmisión de conocimientos científicos y tecnológicos para desarrollar nuevas aplicaciones, por lo que es un factor crítico para el proceso de innovación y la competitividad.

Según la figura 19, las fuentes de transferencia u orígenes de la tecnología transferida son de muy diverso tipo tales como universidades, centros de investigación, laboratorios, centros tecnológicos y otras empresas. Hay que tener en cuenta que transferir tecnología implica adquirir, ceder, compartir, licenciar, acceder o posicionar conocimiento innovador en el mercado.

Figura 17. Participantes de los procesos de transferencia de tecnología.



Modificado de: Hidalgo Antonio; Colección EOI Tecnología e Innovación; Mecanismos de transferencia de tecnología y propiedad industrial entre la Universidad, los Organismos Públicos de Investigación y las Empresas. 2006.

Análisis DOFA: El análisis DOFA es una herramienta de diagnóstico y análisis para la generación creativa de posibles estrategias a partir de la identificación de los factores internos y externos, dada su actual situación y contexto. Se identifican las áreas y actividades que tienen el mayor potencial para un mayor desarrollo, mejora y que permiten minimizar los impactos negativos del contexto.

El nombre es un acrónimo de las iniciales de los factores analizados: Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas. En primer lugar se identifican los cuatro componentes de la matriz, divididos en los aspectos internos que corresponden a las fortalezas y las debilidades, y los aspectos externos o del contexto de la organización o situación que corresponden a las oportunidades y las amenazas.

Debilidad: Se refiere a las limitaciones, problemas y obstáculos de carácter interno que puede afectar negativamente conseguir el objetivo planteado.

Oportunidad: factor de carácter externo caracterizado por ser una situación que brinda las posibilidades en tiempo, espacio y características de realizar una actividad o desarrollar algo.

Fortaleza: Cualidades que pueden ser controladas y que gracias a ellas se facilita el desarrollo de una actividad e implementar en este caso una tecnología.

Amenaza: Principalmente regulaciones y características externas que imposibilitan o dificultan la realización de un objetivo propuesto.

En adelante se llevará a cabo el análisis y desarrollo de la herramienta matriz DOFA a cada uno de los temas y tecnologías propuestas en este documento que dan solución a los problemas ya descritos.

4.1. APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS.

A continuación se resume en una sola matriz DOFA la evaluación de las tecnologías del ciclo orgánico Rankine, el ciclo Kalina para su implementación en el escenario nacional colombiano debido a que estos proyectos comparten el mismo principio de utilizar pozos petroleros para la generación de electricidad y otros tipos de usos que beneficiarían a la industria de los hidrocarburos.

Tabla 12. Matriz DOFA para el aprovechamiento de aguas de producción de campos petroleros.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - En el país no existe un banco de datos accesibles de gradiente geotérmico de todos los campos petroleros del territorio nacional dificultando una evaluación de los potenciales escenarios que puedan soportar exitosamente un proyecto de esta índole. - En Colombia no existe un trabajo riguroso sobre rendimientos de los fluidos de trabajo, los cuales son recetas propias de cada investigación llevadas a cabo en un determinado proyecto. Este tipo de rezagos del conocimiento del comportamiento de los fluidos aptos para el proceso binario podría genera impactos directos en futuros prospectos pilotos en los campos petroleros nacionales debido a la intrincada relación existente entre las propiedades termodinámicas de un fluido de trabajo y su comportamiento (rendimiento) en el sistema con ciertos parámetros operacionales. - En el país se cuenta con producciones de petróleo pesado los cuales tienen asociados en su composición un sinnúmero de sustancias perjudiciales que afectarían el rendimiento del proceso debido a la generación de obstrucciones en las líneas de transporte de los fluidos así como en el interior de las unidades de los intercambiadores de calor. Esto se traduciría en mayores costos de pre tratamiento de los fluidos geotérmicos con inhibidores de incrustaciones, de corrosión u otros mecanismos preventivos. - Los diferentes pozos usados en el proceso deben tener una temperatura similar debido a la disminución de la eficiencia en el proceso provocada por la existencia de pozos con temperaturas más bajas que otros dentro del campo. - Poca formación profesional especializada colombiana dirigida a este tipo de propuestas tecnológicas de vanguardia en contraste a un alto grado de desconocimiento de este tipo de proyectos en el renglón energético del país. 	<ul style="list-style-type: none"> - Este tipo de proyectos amplía las posibilidades de utilización de un recurso que aún no se ha explotado para generación eléctrica como lo es la energía Geotérmica en Colombia impulsados mediante la ley 1715 del 13 de mayo del 2014 que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional la cual junto al estatuto tributario incentiva estos proyectos con beneficios tributarios y arancelarios. El proyecto tendrá como beneficio adicional un mayor apalancamiento económico, en el caso de venta de bonos de CO₂ ya que permite su financiamiento y la recuperación más rápida de la inversión. - El sistema aumenta la eficiencia energética del campo petrolero explotando la energía en forma de calor de los productos de producción que antes no se estaba aprovechando. Con la producción de energía eléctrica a partir de esta tecnología puede beneficiarse también un campo en el sentido económico, ambiental y además de confiabilidad eléctrica, ya que con frecuencia los cortes eléctricos son un verdadero dolor de cabeza para las compañías, debido a que probablemente son una de las razones de más peso en cuanto a las diferidas en producción de crudo y gas ya que afectan de manera directa el tiempo que dura el corte eléctrico y los problemas que puedan presentarse en el arranque de las bombas principalmente electro sumergibles y de cavidades progresivas; en varias oportunidades estadísticamente posteriormente a un corte de energía , los finos asociados a los fluidos de producción se asientan en la bomba haciendo que no arranque generando la necesidad de intervenir el pozo. - El diseño de los modelos de esta evaluación es extensible a todos aquellos campos petroleros en los cuales las temperaturas y las condiciones necesarias se ajusten al modelo en cuestión. - En Colombia existe el potencial geotérmico en un número importante de campos petroleros con temperaturas en cabeza de pozo anormales los cuales cabe resaltar Apiay, Suria y Castilla en el piedemonte Llanero.

Fortalezas:	Amenazas:
<p>- En Colombia existe un talento humano con formación académica idónea como lo son los ingenieros de petróleos, químicos, mecánicos, eléctricos y electrónicos entre otros que cuentan con la destreza de llevar a cabo este tipo de proyectos a buen término.</p> <p>En términos económicos se encontró que el costo de la generación con la fuente geotérmica puede ser inferior a la compra de energía en la red (entre 20 % y 50 % menor). Vale la pena resaltar además que desde una perspectiva económica, esta clase de proyectos son atractivos porque los costos de perforación y extracción del agua geotérmica no están incluidos en los costos de instalación. Lo anterior hace que los costos totales del proyecto se reduzcan en un 50 % frente a los proyectos geotérmicos típicos donde se requieren estudios geotécnicos, exploraciones y perforaciones que permitan determinar, caracterizar y obtener el recurso. Sin contar con el hecho de recuperar petróleo de pozos con altos cortes de agua propensos a cierre por su ya baja productividad. Referenciar.</p> <p>- Cabe resaltar que ya existen referencias a nivel mundial de proyectos vigentes que se pueden consultar para complementar el proceso de aprendizaje en Colombia disminuyendo así tiempo y esfuerzos en vías de obtener mejores resultados. Uno de esos estudios rigurosos fue llevados a cabo en China en el campo petrolero de Huabei en donde funciona un modelo piloto de este tipo el cual ha dado muy buenos resultados en el tiempo. Además en Colombia existe la voluntad de probar el COR en el Piedemonte Llanero por parte de las directivas de Ecopetrol como plan estratégico de autoabastecimiento de energía eléctrica.</p>	<p>- Los proyectos de este tipo necesitan la compra y evaluación de tecnologías extranjeras los cuales se ven altamente afectados por la tasa de cambio impactando directamente la viabilidad de implementación en un campo.</p> <p>- Es necesario la creación de nuevos y más incentivos que beneficien principalmente la compra de excedentes de energía que se generen a partir de este tipo de tecnologías con el fin de integrarla a la red eléctrica nacional.</p> <p>- El precio del petróleo limita en gran medida las inversiones de esta categoría en las compañías de energía como Ecopetrol debido al recorte de gastos que se deben hacer al disminuir los ingresos por los bajos precios de los hidrocarburos en el mercado global.</p>

Tabla 13. Matriz estratégica para el aprovechamiento de aguas de producción de campos petroleros.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<p>- Estos proyectos pueden hacer uso de los bonos de emisiones de CO₂, los beneficios tributarios y arancelarios otorgados por el estatuto tributario y la ley 1715 del 13 de mayo del 2014 que en complemento con los ahorros de costos representados en los pozos petroleros ya</p>	<p>- Las empresas petroleras actualmente y debido a los bajos precios internacionales de petróleo son las más necesitadas en evitar fugas de capital por lo tanto deben estar enfocadas y actualizadas en la eficiencia energética del campo por lo tanto son estas mismas las que</p>

<p>existentes usados para la explotación geotérmica la inversión se reduce en más de un 50% de su costo inicial comparado con un proyecto de geotermia convencional. Esto genera altos rendimientos económicos reflejados en retornos en menor tiempo de la inversión (TIR).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si bien a nivel mundial la tecnología está lo suficientemente avanzada para ser aplicada; son directamente los ingenieros locales los que deben cumplir la tarea de adaptar este tipo de tecnologías en los campos con gradientes geotérmicos anormales de nuestro país como lo son Suria, Apiay y Castilla. - En todo proyecto de eficiencia energética y/o confiabilidad eléctrica enfocados desde el punto de vista que compete aquí es de suma importancia contar con las experiencias a nivel mundial. Es por ello que se deben revisarse las investigaciones y proyectos de este tipo y con ellos adaptarlos a la necesidad particular. 	<p>fácilmente pueden actualizar una base de datos confiable y responsable del potencial geotérmico que contienen sus yacimientos y/o fluidos producidos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Los incentivos tributarios arancelarios de bonos de CO₂ no solamente pueden ser utilizados para la maquinaria, equipos e investigaciones necesarias para contrarrestar los problemas operacionales que pueden causar los fluidos de yacimiento como incrustaciones, precipitación de parafinas, asfáltenos, corrosión etc. sino también para todos aquellos equipos e infraestructura que puedan necesitarse en este tipo de proyectos. - Por medio de un previo diseño y estudio del gradiente geotérmico de cada uno de los pozos de un determinado campo petrolero se puede evaluar el aporte energético que pueden aportar cada uno a la generación eléctrica para así descartar los pozos problema que disminuyen la eficiencia del proceso en general.
<p>Estrategias Y Acciones DA:</p>	<p>Estrategias Y Acciones FA</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Capacitar talento humano profesional a través de convenios con universidades y expertos internacionales en explotación de sistemas geotérmicos de media y baja entalpia con el objetivo de que se realice a nivel nacional un análisis enfocado a mecanismos para la generación de incentivos: tributarios y arancelarios a la venta de excedentes de energía eléctrica para mitigar los impactos generados por los bajos precios internacionales del petróleo. Adicional a esto deben también enfocarse al desarrollo de tecnologías propias que no necesiten la importación de tecnología extranjera con el objetivo de minimizar los impactos generados por el cambio de divisa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gracias a que los costos pueden reducirse a un 50% debido a la existencia los pozos petroleros preexistentes y de un análisis detallado del yacimiento, este tipo de proyectos cuentan con la facilidad de completar el resto de la fase de desarrollo comprando la maquinaria y equipo extranjero asumiendo una tasa de cambio alta que otros proyectos geotérmicos nuevos no pueden darse el lujo de asumir. - El Estado debe formular políticas que incentiven el desarrollo de las energías renovables con más auge y celeridad del que se ha hecho hasta ahora. Esto puede llegar a darse fácilmente gracias a todas las investigaciones que sobre estas tecnologías se han desarrollado, investigado y evaluado internacionalmente y que deban ser revisadas por profesionales idóneos que sintetizen las necesidades propias del país para poder ser desarrolladas. Estos incentivos a la investigación para la creación de conocimiento nacional con respecto al desarrollo de tecnologías de explotación de los pozos petroleros geotérmicamente disminuyen en gran medida los costos de inversión inicial ya que los proyectos de pre factibilidad pueden verse ampliamente abordados en estas investigaciones y esto puede mitigar aún más los impactos del precio del petróleo en las empresas como Ecopetrol.

4.2. ANÁLISIS DOFA PARA LA SÍSMICA PASIVA USADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS PETROLEROS EN COLOMBIA: CASO PUERTO GAITÁN, CUSIANA Y CUPIAGUA.

Tabla 14. Matriz DOFA para la sísmica pasiva usada en la caracterización de yacimientos petroleros en Colombia: caso Puerto Gaitán, Cusiana y Cupiagua.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - Es un método que no es ofrecido por empresas de servicios ya que tiene que ser desarrollado por la misma compañía operadora dependiendo del uso que se le quiera dar. - Es costosa la inversión de instalación del sistema de monitoreo junto con el departamento de interpretación sísmológica. - Está sujeto a alto margen de error sino se cuenta con las herramientas necesarias para su correcta interpretación y ajuste. 	<ul style="list-style-type: none"> - Este enfoque promueve un recurso tecnológico casi inexplorado por la industria petrolera en Colombia que trae beneficios económicos. - Optimizar la caracterización de yacimientos petroleros en Colombia que cuenten con actividad sísmica. - Su uso no genera choques con las comunidades como lo hace la sísmica convencional.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - Aprovechar la microsismicidad de la Tierra como fuente de datos valiosísimos para la mejor comprensión de los yacimientos petroleros colombianos. - Los datos obtenidos se pueden aprovechar desde muchas áreas del conocimiento petrolero como la geomecánica, yacimientos, producción entre otras. - Existe ya una red sísmológica nacional instalada funcionando desde décadas la cual puede proporcionar una vasta colección de datos sísmicos en una gran parte del territorio nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pocas aplicaciones en campos petroleros en Colombia, es decir, poco conocimiento técnico al respecto en el país. - Limitado su uso a áreas donde exista actividad sísmica natural las cuales se ubican en zonas tectónicamente activas o casos puntuales en donde se presenten actividad sísmica anormal que se pueda atribuir a la producción de hidrocarburos. - El escepticismo de los directivos de las empresas petroleras al dudar de su confiabilidad como herramienta de monitoreo del comportamiento de los fluidos en yacimiento.

Tabla 15. Matriz estratégica para la sísmica pasiva usada en la caracterización de yacimientos petroleros en Colombia: caso Puerto Gaitán, Cusiana y Cupiagua.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - Por medio del uso de la microsismicidad de la Tierra se pueden obtener datos sumamente importantes para complementar los modelos numéricos de caracterización de los campos petroleros disminuyendo la incertidumbre en estos sin la necesidad de invertir grandes sumas de dinero, - Usar la red sismológica nacional con el propósito de hacer estudios de prospección sísmica sin recurrir al uso de la sísmica activa evitaría demasiadas molestias a las comunidades aledañas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Al utilizar este recurso en una escala mayor, esto promueve beneficios económicos los cuales compensarían los costos de inversión inicial para su implementación completa trayendo beneficios valiosos en la caracterización de los yacimientos, junto con la minimización de los choques sociales que generan las técnicas de prospección sísmica activa. - Si no se cuentan con los recursos económicos para instalar una red propia de sismología dentro del campo, se puede hacer uso de los datos obtenidos por décadas de la Red Sismológica Nacional la cual ofrece este tipo de servicios. - El ajuste del modelo propuesto genera más beneficios técnicos y económicos en el campo de aplicación que no ajustándolo con los medios ya descritos en el capítulo anterior.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<ul style="list-style-type: none"> - Capacitar al poco personal de los campos Cusiana y Cupiagua que ha trabajado con esta técnica durante un tiempo considerado con el fin de acompañar proyectos similares en el país para obtener mayores beneficios económicos al expandir el portafolio de servicios de la empresa a la que pertenecen con tecnologías más amigables con la sociedad circundante y que aumentan al mismo tiempo el entendimiento de los yacimientos caracterizados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mostrar los resultados obtenidos en los campos de Cusiana y Cupiagua junto con el análisis económico para servir como modelo estratégico en la implementación de este método en otros campos y así extender su uso junto con sus beneficios en el territorio nacional para aumentar su conocimiento en la gerencia de recursos de hidrocarburos.

4.3. ANÁLISIS DOFA PARA UN MODELO 3D HIDROGEOLÓGICO Y GEOMECÁNICO PARA EL MEJORAMIENTO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO EN THE GEYSER EN CALIFORNIA USA.

Tabla 16. Matriz DOFA para un modelo 3D hidrogeológico y geomecánico para el mejoramiento de un sistema geotérmico en the Geyser en California USA.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - No se cuenta con el personal profesional y técnico en el área geotérmico colombiano para llevar a cabo este tipo de modelamiento en 3D. - Pocas aplicaciones de este tipo de integrar los parámetros geomecánicos como hidrológicos en el modelamiento de un sistema geotérmico mejorado. - La validación del modelo se vuelve dispendiosa y costosa volviéndose una limitante para su futura aplicación en pilotos como el llevado a cabo por ISAGEN en cercanías del Nevado del Ruiz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Convertirse en un futuro un modelo ejemplo para aplicarlo en la caracterización de este tipo de yacimientos en este país ya que empresas como ISAGEN tiene proyectado en su plan de proyectos corporativo la explotación de este tipo de yacimientos con el fin de diversificar su portafolio energético. - Este modelo tiene el potencial de adaptarse a la simulación de acuíferos asociados a los yacimientos petroleros para determinar los futuros rendimientos y comportamientos de todo el sistema geológico de hidrocarburos. - Se puede aprender de esta metodología técnica para empalmarlo con aplicaciones petroleros de estimulación por fracking de yacimientos no convencionales debido a su similitud con los procesos de estimulación de yacimientos geotérmicos mejorados.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - En Colombia existe un potencial geotérmico el cual se está teniendo en cuenta como un recurso energético estratégico para el país. - Se cuenta en el país con un grupo de investigación enfocado al estudio de los parámetros geomecánicos de los yacimientos petroleros, quienes están en la capacidad de aprender de esta metodología en mención con el fin de mejorar modelos ya preexistentes o para el desarrollo de uno nuevo. - El modelo ya fue probado en un caso real arrojando resultados acertados en la caracterización de yacimientos geotérmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - En Colombia aún no se ha desarrollado la industria de la Geotérmica y mucho menos se ha trabajado en un sistema mejorado de este tipo. - Apoyo muy limitado en Colombia para llevar a cabo este tipo de investigaciones relacionados a la geomecánica de los yacimientos tanto petroleros como geotérmicos.

Tabla 17. Matriz estratégica para un modelo 3D hidrogeológico y geomecánico para el mejoramiento de un sistema geotérmico en The Geysers en California USA.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<p>- Aprovechar la etapa de desarrollo del campo geotérmico en cercanías del Nevado del Ruiz con el fin de combinar esfuerzos entre ISAGEN y grupos de investigación del país que diseñen estrategias de evaluación de los modelos aprovechando la información recolectado en las diferentes etapas del prospecto con el fin de mejorar los futuros proyectos geotérmicos en el país.</p> <p>- Integrar al grupo de investigación de geomecánica de la Escuela de Ingeniería de Petróleos UIS una línea encaminada al estudio de la geomecánica de yacimientos geotérmicos con el fin acoplar este tipo de modelos en mención con la experticia que el grupo cuenta con el fin de obtener mejores resultados en su simulación numérica.</p> <p>- Incentivar a las empresas petroleras para que inviertan un poco más de esfuerzos para usar este tipo de modelos con el fin de caracterizar acuíferos asociados a yacimientos petroleros y acoplarlos con la simulación total de un sistema petrolífero.</p>	<p>- La exitosa implementación de este tipo de modelos para comprender un sistema geotérmico como una estructura dinámica la cual cambia a medida de su vida productiva trae consigo tantos beneficios que validan su uso en campo.</p> <p>- Las oportunidades de su implementación no se limitan en yacimientos geotérmicos sino también en prospectos petroleros no solo convencionales sino también no convencionales como lo son el fracking en lutitas debido a la similitud en el proceso de mejoramiento en las condiciones de los yacimientos.</p>
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<p>- A medida que los grupos de investigaciones enfoquen su mira hacia los recursos geotérmicos ahondaran esfuerzos de profundización para entender este tipo de yacimientos y que mejor implementando modelos ya probados como el mencionado los cuales por medio de pequeños ajustes y pruebas pueden generar resultados acordes a las expectativas de los grandes proyectos en el país.</p> <p>- Este tipo de propuestas metodológicas ya estructuradas y aplicadas en proyectos serios de geotermia en otros países generan expectativa para su implementación en Colombia lo cual puede generar incentivos que avalen su uso al menos como fines de investigación académica en universidades. Los resultados que estos esfuerzos investigativos arrojen potencian el interés de las compañías operadoras de evaluarlos en campos reales del ámbito nacional y con ello un posible uso comercial.</p>	<p>- Trabajos de grado como el presente muestran al contexto nacional las oportunidades de crear sinergia entre los avances petroleros en el campo geotérmico nacional e incentivar la implementación de los proyectos geotermiales de una forma más eficiente y con mejor entendimiento de la estructura.</p>

4.4. ANÁLISIS DOFA PARA UNA OPTIMIZACIÓN DE UBICACIÓN DE POZOS Y EL CONTROL PARA UNA PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA BAJO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA.

Tabla 18. Matriz DOFA para una optimización de ubicación de pozos y el control para una prospección geotérmica bajo incertidumbre geológica.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - La obtención de la licencia del software para llevar a cabo la simulación genera costos adicionales. - Es un modelo que al inicio solo arroja posibles resultados de producción evaluando las decisiones de ingeniería de distribución de pozos y su diseño mecánico bajo mucha incertidumbre debido a la falta de detalle de la geología y propiedades petrofísicas alimentadas en la simulación. - No se cuenta con estudios aterrizados en Colombia de este tipo de modelos, esto limita el interés de aplicarlo en casos reales en proyectos nacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comprender y maximizar la rentabilidad de la operación de producción en etapas tempranas del desarrollo del campo. - Este enfoque de optimización también se puede utilizar para gestionar otras operaciones de recursos geológicos, tales como la producción de hidrocarburos o de secuestro de CO₂, bajo condiciones de yacimiento inciertos.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - ISAGEN terminó el proceso de evaluación de factibilidad del proyecto geotérmico cerca al Nevado del Ruiz en donde el siguiente paso a seguir es la etapa de desarrollo del campo donde esta herramienta de optimización sería una base para desarrollar un modelo inicial hidrotermal con el cual se puede evaluar diferentes escenarios de producción geotérmica a través del espaciamiento y distribución de los pozos en etapas iniciales del desarrollo del prospecto. - Permite evaluar los impactos de los parámetros de diseño de ingeniería con poca información de la geología del subsuelo posibilitando la entrada de datos nuevos en el transcurso de las operaciones de producción. - Se puede evaluar el efecto sobre la producción de hidrocarburos que tienen los acuíferos activos en un sistema petrolero bajo incertidumbre geológica por medio de un modelo hidrogeológico. - Existe un caso real en el cual es aplicado el modelo en el cual se obtuvieron excelentes resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Existen servicios de simulación de yacimientos ofrecidos por Schlumberger o Halliburton que son comerciales e incluyen soporte técnico, esto evita que la compañía operadora no se interese en desarrollar sus propios simuladores y modelos hidrotermales. - Escepticismo por los altos directivos de utilizar métodos de este tipo por su cuestionable confiabilidad y mucho más en Colombia que no se ha llevado a cabo estudios juiciosos aplicados con los parámetros de los prospectos geotérmicos nacionales. - Pocos escenarios de aplicación en Colombia. - Poco interés en la industria del petróleo de profundizar en el área de hidrogeológico de los campos de hidrocarburos que tienen asociado un acuífero.

Tabla 19. Matriz estratégica para una optimización de ubicación de pozos y el control para una prospección geotérmica bajo incertidumbre geológica.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<p>- Con el pronto desarrollo de modelos como el mencionado se obtienen la disminución de la incertidumbre que generan ciertos planes de desarrollo en los futuros proyectos geotérmicos de Colombia.</p> <p>- Por medio del acompañamiento de la experticia de los ingenieros más preparados en campo se pueden adaptar este tipo de modelos con el fin de acoplarlos a las necesidades propias de los prospectos nacionales.</p> <p>- ISAGEN se puede convertir en plataforma técnica para evaluar la viabilidad de este tipo de modelos que optimizan el proceso de la perforación de los pozos en un campo geotérmico en pleno proceso de desarrollo en etapas tempranas.</p>	<p>- Es un modelo que no se limita al uso del campo geotérmico sino también ofrece posibilidades de extenderse a la rama petrolera a través del estudio de los acuíferos asociados a los yacimientos de hidrocarburos para mejorar su explotación comercial.</p> <p>- A través de los grupos de investigación tanto privados como universitarios se puede extender el conocimiento de estos modelos acoplándolos con las actividades de desarrollo llevadas a cabo en geotermia como petroleras.</p>
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<p>- A medida que aumenten los estudios de este tipo en el ámbito académico por medio de los grupos de investigación lo mismos resultados atraerán el interés de las grandes compañías para quererlos aplicarlos en sus campos con el fin de obtener diferentes tipos de herramientas que les permita evaluar los futuros rendimientos de los planes estratégicos de explotación con mucha incertidumbre geológica.</p>	<p>-Son muchas las compañías dispuestas a desarrollar modelos numéricos que les permita evaluar los posibles resultados de sus estrategias de perforación en un campo con alta incertidumbre geológica para minimizar los costos de operación que se pueden evitar desde el inicio de las operaciones de perforación.</p> <p>- Por medio del estudio de los parámetros geomecánicos y de flujo de fluidos a través de medios porosos complementados con los datos obtenidos del estudio previo a todo prospecto geotérmico se pueden obtener modelos prácticos como el mencionado que pueden fácilmente competir con los modelos numéricos comerciales de compañías contratistas con el gran agravante de ser más económicos.</p>

4.5. ANÁLISIS DOFA PARA LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A PARTIR DE POZOS PETROLEROS ABANDONADOS.

Tabla 20. Matriz DOFA para la energía geotérmica a partir de pozos petroleros abandonados.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - No existe una base de datos y un mapeo actualizado de la distribución de todos los pozos abandonados con su respectivo gradiente geotérmico accesible para evaluar futuros proyectos geotérmicos en el país. - Poca investigación relacionada con esta clase de recursos por parte de toda la coyuntura minero energética del país desde las universidades, hasta las empresas y el estado. - Son limitados los campos que cuentan con un gradiente geotérmico explotable para este fin. - Está limitada la venta de energía eléctrica excedente a la red nacional, producida a partir de este tipo de tecnologías en campos petroleros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Explotar activos de empresas petroleras que se creían no tenían ya ningún valor. - Proveer de autosuficiencia energética a los campos petroleros que cuenten con el recurso aplicando políticas más amigables con el medio ambiente. - Diversificar el portafolio de tecnologías por parte de las operadoras que lleve a cabo este tipo de proyectos con el fin de crear sinergia entre la industria petrolera y la geotérmica.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - El uso de este intercambiador de calor en pozo evita el uso de fluidos geotérmicos (producidos desde un pozo geotérmico) y los impactos ambientales que estos acarrearán así como también los requerimientos energéticos para la reinyección son fuertemente reducidos. - Existe el recurso en el país, un número considerable de pozos abandonados en campos con altos gradientes geotérmicos listos para ser explotados. - El atractivo de este sistema se debe al hecho de la existencia de una amplia gama de estudios que los interesados pueden consultar en los medios virtuales más importantes del mundo. - Existe un gran potencial de optimizar el proceso por medio del ajuste y optimización de los parámetros de operación tales como el comportamiento termodinámico del fluido inyectado así como el usado en el ciclo Rankine, variables de diseño de los equipos, etc. con el fin de obtener mejores eficiencias energéticas. 	<ul style="list-style-type: none"> - La reactivación de pozos abandonados debe ser aprobada por el ministerio de minas y energía por lo tanto la certeza que puede tenerse en cuanto a dicho procedimiento es algo que pone algo de ambigüedad. - Falta de incentivos por parte del gobierno nacional a este tipo de proyectos ya que al ser desarrollados se genera empleo, desarrollo, más productividad y ambientalmente se ahorra emisiones de gases efecto invernadero. - Los pozos abandonados necesitan de una inversión adicional para su correspondiente explotación debido a que se necesitan muchas veces hacer trabajos de recuperación y su consecuente reacondicionamiento.

Tabla 21. Matriz de estrategias para la energía geotérmica a partir de pozos petroleros abandonados.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - Por medio del uso del WBHX en pozos petroleros se ayuda a los campos petroleros en los cuales se pueda aplicar la tecnología de autosuficiencia energética disminuyendo la dependencia de la red nacional eléctrica y con ello los cortes eléctricos que trae como beneficio adicional la disminución de los diferidos que estos le generan a la producción de hidrocarburos. - Se puede adaptar el modelo del WBHX a Colombia haciendo un estudio exhaustivo de todas las referencias bibliográficas a nivel mundial con el fin de identificar las condiciones operacionales óptimas para su uso y ubicar los posibles escenarios en el país en donde su implementación ofrezca los más altos beneficios a la empresa que desee aplicarlo. Por medio de este estudio se puede optimizar el proceso por medio de criterios de diseño de los equipos de las facilidades de superficie así como los de pozo. - Al optimizar el proceso WBHX se diversifica el portafolio tecnológico de la compañía trayendo beneficios económicos frente a otras empresas al utilizar más eficientemente recursos que antes no generaban ningún tipo de ingresos económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Construir un mapeo de la distribución y el número de pozos abandonados en el país con su respectivo gradiente geotérmico con el fin de facilitar a empresas del sector geotérmico así como petroleros la evaluación de futuros proyectos de generación eléctrica aprovechando este recurso valioso para los colombianos. - Gestionar ante el Gobierno la creación de una norma especial que les permita a las empresas petroleras las cuales implementen la explotación de pozos abandonados como fuente de generación eléctrica en Colombia la venta de electricidad a la Red Nacional Eléctrica.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<ul style="list-style-type: none"> - Gestionar ante el Gobierno Nacional incentivos que permita a las empresas petroleras financiar proyectos dirigidos a aprovechar este tipo de recursos antes despreciados. - Promover en los grupos de investigación de energías renovables la evaluación y profundización de este tipo de iniciativas con el fin de desarrollar estrategias y técnicas de origen colombiano que viabilicen aún más su uso en los campos petroleros así como geotérmicos del país. - Gestionar ante el gobierno una política de licencias especial para la reactivación de pozos abandonados con el fin de impulsar este tipo de proyectos de alto impacto ambiental, social y económico del país. 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar un plan piloto en uno de los campos Suria, Castilla o Apiay con el fin de evaluar el verdadero potencial de este tipo de tecnologías en el territorio nacional con el fin de incentivar beneficios tributarios, arancelarios y comerciales y con ello impulsar futuros proyectos de este tipo en los demás campos que cumplan con los requisitos. - Aplicar a los bonos de CO₂ y demás beneficios tributarios y arancelarios a los cuales este tipo de proyectos tienen derecho a participar. Por medio de este tipo de incentivos se puede gestionar parte de su financiamiento con el fin de volverse una fuente de energía eléctrica competitiva a nivel regional y nacional.

4.6. TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN DE CIRCULACIÓN EN REVERSA GAS-LIFT.

Tabla 22. Matriz DOFA para la tecnología de perforación de circulación en reversa gas-lift:

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - Desconocimiento por parte de los ingenieros de perforación nacionales en este tipo de prácticas para ser implementadas en proyectos futuros como los impulsados por ISAGEN en el Nevado del Ruiz. - Inexperiencia de las empresas operadoras del sector energético nacionales como Ecopetrol e ISAGEN de los diferentes aplicaciones y beneficios de la circulación en reversa de Gas-lift sumado al total desconocimiento de los altos directivos de la existencia de este mecanismo de perforación en el mercado global.- Limitada por la profundidad de perforación que es restringida por el peso que el swivel puede soportar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proyectar al país como líder en aplicar nuevas tecnologías de vanguardia a la explotación de recursos energéticos del subsuelo con el fin de generar valor agregado a los adelantos técnicos desarrollados a partir de las experiencias nacionales. - Explorar nuevas alternativas de perforación como este modelo expuesto con el fin de diversificar el portafolio de servicios de taladro para diferentes escenarios geológicos presentes en Colombia. - Mejorar el diseño de la sarta de perforación con el fin de eliminar restricciones a partir de las experiencias futuras que se puedan obtener con este tipo de tecnologías aplicadas en el contexto nacional.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - En Colombia es común encontrar un sinnúmero de formaciones problema caracterizado por ser frágiles y fracturadas y son aún más comunes en los proyectos geotérmicos los cuales se presentan en zonas tectónicamente activas siendo un escenario atractivo para la implementación de este sistema de perforación no solo en proyectos geotérmicos sino también petroleros. - Esta tecnología es fácilmente asimilable por parte de los ingenieros de perforación presentes en el país debido a la similitud existente entre los sistemas. Para este tipo de perforaciones es necesaria una pequeña demostración y capacitación técnica para obtener talento humano capacitado nacional. -A nivel mundial existen compañías que ofrecen en sus portafolios de servicios esta tecnología lo cual facilita a las empresas operadoras contratarlas para aprovechar su experticia y obtener de forma óptima los beneficios que estos ofrecen. 	<ul style="list-style-type: none"> - No existe en Colombia la primera torre de perforación de este tipo para ser implementada en caso de ser necesaria en un prospecto debido al poco desarrollo del mercado geotérmico en el territorio nacional, por ello los costos para la implementación del método en mención son altos no por la implementación técnica sino por los sobrecostos referidos a la transferencia del servicio de un país a otro. - Los pocos prospectos geotérmicos que se encuentra en estudio de factibilidad arrojen resultados negativos en cuanto a viabilidad económica y no se lleven a cabo las posteriores inversiones generando el estancamiento de cualquier desarrollo de este tipo en el país. - Implementar otros diseños de sarta menos sofisticados implica menores costos de contratación pero con mayores riesgos en perforación generan un escenario inicial bastante competitivo que pobremente puede ofrecer atracción comercial de esta clase de tecnologías en el país.

Tabla 23. Matriz estratégica para la tecnología de perforación de circulación en reversa gas-lift:

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - Aprovechamiento de los proyectos actuales geotérmicos en Colombia como el llevado a cabo en el Nevado del Ruiz con el fin de probar este mecanismo de perforación y así obtener las primeras experiencias en el país en las formaciones y condiciones propias a nuestra geología local con el objetivo de aprender de estas y comenzar a construir mejores planes de perforación para los siguientes prospectos profundizando en diferentes tipos de técnicas no solo las convencionales. - Por medio de la capacitación de personal calificado colombianos complementado con su experiencia en perforación en diferentes escenarios del país se puede llevar a cabo un mejoramiento del diseño de los componentes de la sarta de perforación por Gas-Lift con el fin de obtener los mejores rendimientos dependiendo de los requerimientos locales. - Por medio de los servicios que empresas como Halliburton, Schlumberger y otras más del ámbito internacional el país puede explorar esta técnica de perforación con todo el soporte técnico que estas compañías ofrecen para obtener los mejores resultados en las áreas de interés y así diversificar las opciones de perforación que mejor se adapten a cada situación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacitar personal de las empresas nacionales del sector energético como Ecopetrol e ISAGEN sobre el uso de la perforación Gas-lift con el fin de obtener un conocimiento más detallado y técnico que permita a las compañías operadores del país contratar este tipo de servicios en los casos específicos que sean verdaderamente necesarios valorado cualquier mecanismo evaluativo. Además los grupos de investigación tanto del sector privado así como del sector académico pueden desarrollar en conjunto modelos que permitan evaluar el desempeño de esta tecnología y con ello poder optimizarla para des limitar las restricciones observadas en la práctica.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<ul style="list-style-type: none"> - Crear un panel de trabajo entre las empresas de servicio del sector privado como Halliburton y Schlumberger con las empresas operadoras del sector público como Ecopetrol e ISAGEN con el fin de integrar esfuerzos de mutua colaboración de asesoramiento tanto técnico como financiero y con ello se pueden ajustar agendas de ambos sectores en pro de ofrecer respuestas de servicio más concretas a los requerimientos del mercado nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> - Generar incentivos arancelarios y tributarios extensibles a las compañías de servicios para estimular la importación de tecnologías de vanguardia como la perforación de Gas-lift al territorio nacional siempre lista para ser usada en los diferentes proyectos geotérmicos así como también en los petroleros con el objetivo de aumentar la competitividad de este servicio con respecto a los convencionales ya existentes en el país. - Integrando el mercado nacional de prestación de servicios de perforación sin excluir a los internacionales a los proyectos geotérmicos del país desde su fase inicial para que estos mismos se puedan involucrar en todas las fases de los prospectos ofreciendo servicios puntuales a los requeridos a cada una de las etapas de desarrollo del

	<p>campo. Con esto se asegura una pronta respuesta por parte de las compañías contratistas a los requerimientos de las operadoras dinamizando aún más el mercado de servicios con el objetivo de potencializar el mercado geotérmico en Colombia. Las empresas nacionales están en condiciones de competir con las internacionales en la implementación de esta tecnología capacitando su talento humano para suplir las necesidades nacionales con recursos nacionales.</p>
--	--

4.7. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN EN UN CAMPO GEOTÉRMICO.

Tabla 24. Matriz DOFA para procesos de tratamiento de los fluidos de producción en un campo geotérmico:

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - Costos de operación y mantenimiento elevados de la mayoría de tratamientos. - No existe una base de datos nacional de la composición de los fluidos de producción y geotermales del territorio nacional. - La industria geotérmica aún no está desarrollada en Colombia, está en una fase de estudio de evaluación por consiguiente en el país no se requieren a corto plazo de los servicios de instalación de este tipo de procesos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Amplia variedad de tratamientos para todo tipo de composiciones químicas de los fluidos de producción petroleros y geotérmicos que soportan una extensa gama de exigencias operacionales según el requerimiento de los diferentes proyectos en el país. - Existe el personal colombiano cualificado para operar las más modernas plantas o sistemas de tratamientos que son requeridas en el ámbito nacional. - Apoyo por parte de los centros de investigación nacionales para complementar la evaluación de las tecnologías de tratamientos hechas a nivel internacional para construir las propias estrategias tecnológicas que en realidad requiere el mercado colombiano.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - En Colombia existe una gran variedad de fluidos de producción asociados a la industria petrolera que necesitan tratamientos para evitar problemas operacionales en los pozos y las facilidades de superficie. - Los procesos expuestos son tratamientos basados sobre avances de última generación tecnológica evaluados ampliamente en diferentes condiciones y escenarios soportados técnicamente por un gran número de prestadoras de servicios internacionales quienes garantizan la correcta instalación y funcionamiento de 	<ul style="list-style-type: none"> - La devaluación de la moneda nacional con respecto al dólar. - Disminución de los precios internacionales del petróleo. - Que los proyectos de geotermia no despeguen debido al cambio de políticas del Gobierno Nacional enfocadas al financiamiento de este tipo de iniciativas.

<p>estos procesos en cualquier parte del mundo incluyendo Colombia.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Existen proyectos geotérmicos próximos a entrar en fase de explotación como el caso del Nevado del Ruiz por parte de ISAGEN quienes van a necesitar de asesoramiento para la determinación de la composición química de los fluidos geotermales y la consiguiente instalación de sistemas de tratamiento de estos mismos. - Muchas de estas tecnologías son desconocidas por el potencial cliente nacional las cuales pueden ayudar a alcanzar los requerimientos de ley y operacionales de las plantas geotérmicas así como las facilidades de los diferentes campos petroleros del país con menores costos y tiempos. 	
--	--

Tabla 25. Matriz estratégica para procesos de tratamiento de los fluidos de producción en un campo geotérmico.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - Aprovechar el mercado nacional petrolero para expandir el uso de nuevas tecnologías de vanguardia para el control de los parámetros químicos de los fluidos de producción que evitan los problemas operacionales de las facilidades con el fin de ofrecer un abanico de servicios al empresario colombiano el cual pueda escoger el método que más se ajuste a su presupuesto y necesidades. - Incentivar a los programas académicos de ingeniería de petróleos y afines de las universidades nacionales a que integren en su pensum o formación de sus estudiantes una materia enfocada al tratamiento de los fluidos de producción desde yacimientos del subsuelo con el fin de preparar talento humano para abordar las nuevas exigencias no solo de la explotación de yacimientos petroleros no convencionales sino también de los futuros proyectos geotérmicos que se explotaran en el país. - Incentivar la formación de grupos de investigación en las universidades colombianas con el objetivo de desarrollar estudios de evaluación de las tecnologías de tratamientos hechas a nivel internacional para construir las propias estrategias tecnológicas que en realidad requiere el mercado colombiano. En este marco académico se puede 	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivar la fabricación nacional de las unidades y componentes utilizados en los procesos en mención con el fin de disminuir los costos de adquisición, operación y mantenimiento de estos equipos al ser comprados en los mercados internacionales. - Crear una base de datos confiables de la composición química de los fluidos producidos en los diferentes yacimientos del país por medio de la colaboración del sector privado petrolero como geotérmico en conjunto con los centros de investigación de las universidades del país. - La creación de un portafolio de servicios por parte de las empresas contratistas dirigido al tratamiento de los fluidos geotérmicos del país en compas con las futuras exigencias que este sector energético prevé necesitar impulsaran el desarrollo de este tipo de yacimientos en tiempo y costos debido a una planeación temprana hecha no por la empresa operadora sino por la empresa prestadora de servicio con el fin de concretar anticipadamente acuerdos comerciales que beneficien ambas partes.

<p>fomentar la sinergia entre la industria nacional ya sea de empresas operadoras como contratistas con el desarrollo científico regional dinamizando aún más el mercado energético del país.</p>	
<p>Estrategias Y Acciones DA:</p>	<p>Estrategias Y Acciones FA</p>
<p>- La creación de una base de datos accesible de la composición química de los fluidos de producción impulsarían la oferta de tecnologías de este tipo por parte de las prestadoras de servicios enfocadas a cada una de las necesidades regionales dentro de Colombia ahorrándole tiempo a las operadoras en consultas en los diferentes mercados mundiales. Esto también propondría un mercado oferente más competitivo debido a la facilidad de las contratistas de proponer sus productos a menor precio en los diferentes campos petroleros y geotérmicos sin restricción alguna.</p> <p>- Creación de fondos de ahorro por parte de las empresas operadoras y el gobierno con el objetivo de impulsar proyectos de inversión de tecnología extranjera en momentos que los precios del crudo no permitan a las compañías petroleras financiarlas con sus propios recursos. Aun así existe apalancamiento económico aportado por organismos internacionales como el Banco Interamericano de Desarrollo que respalda financieramente a las empresas colombianas como ISAGEN que están llevando a cabo pilotos de energía geotérmica en el país lo cual les permite a estas compañías a seguir con estos proyectos sin importar si el gobierno cumple o no con las políticas incentivas de arancel y tributación.</p>	<p>- Crear acuerdos de entendimiento mutuo entre las empresas prestadoras de este tipo de tratamientos e ISAGEN cuyo objetivo es evaluar la posibilidad de establecer una alianza estratégica que les permita desarrollar en conjunto una planta de energía geotérmica en el municipio de Villa María, Caldas minimizando los impactos generados por cambios de políticas del gobierno de paso. Además se blinda el proyecto a factores externos como la devaluación de la moneda que afectan directamente a la factibilidad del prospecto al requerir más presupuesto para obtener los mismos resultados.</p> <p>- Desarrollo y penetración de mercado para ampliar la base de clientes con una filosofía de servicio al cliente como estrategia de mercado corporativa.</p>

4.8. ANÁLISIS DOFA PARA LA CAPTACIÓN, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ EN FORMACIONES GEOLÓGICAS EN COLOMBIA.

En Colombia se ha realizado la inyección de CO₂ como técnica de estimulación de pozos (EOR), para el campo Galán, se aplicaron 9 pilotos de inyección cíclica entre octubre de 1989 y octubre de 1992. El objetivo del proyecto era la recuperación de petróleo incremental, basado en la reducción de la viscosidad; en cuanto a la rentabilidad; el resultado fue positivo, sin embargo el proyecto tuvo que ser abandonado, debido a expectativas respecto a otros proyectos, precio del petróleo y la disponibilidad de CO₂.

En el 2008 fue ejecutado otro proyecto para el campo Llanito, donde se logró el aumento del volumen de petróleo a condiciones de yacimiento en un 7%, la reducción de la viscosidad unas 5 a 10 veces para una solubilidad de 0.5% molar de CO₂ a 1500 psi; la producción incremental representó el 57% de la producción total de los pozos intervenidos, sin embargo el proyecto también fue suspendido debido prácticamente a lo mismo que el anteriormente mencionado.

Tabla 26. Matriz DOFA para la captación, transporte y almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas en Colombia.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - No se cuenta con un inventario y mapeo de la producción de CO₂ y por lo tanto es difícil hacer. Estudios serios y comprometidos. - La mentalidad de que somos un país pobre en industria comparado con las grandes potencias y que “no contaminamos” conlleva a que se generalice la poca importancia que tiene el resguardo del medio ambiente para las futuras generaciones. - En proyectos puntuales cerca de la refinería de Barrancabermeja en varios proyectos pilotos de recobro mejorado de inyección de CO₂ se han cerrado por falta de disponibilidad del mismo. - El costo de procesarlo, transportarlo e inyectarlo al reservorio es todavía elevado alrededor de 50 US la tonelada.⁸⁷ - Cuando se usa en proyectos de recobro mejorado EOR, el CO₂ retorna a la superficie cuando se producen de nuevo los fluidos del yacimiento. - No se han realizado en Colombia inyecciones de CO₂ que no sean de proyectos EOR en formaciones no petroleras. 	<ul style="list-style-type: none"> - El apalancamiento que se gestione con los bonos de CO₂ y con ello financiar los proyectos. Los MDL (mecanismo de desarrollo limpio); mediante este mecanismo se pueden adquirir créditos para financiar proyectos de disminución o supresión de emisiones contaminantes en países en desarrollo, se adquieren a través de unidades certificadas de reducción de emisiones (CERs). Estos certificados pueden ser negociados con países o empresas comprometidas con la reducción de emisiones. (Protocolo de Kyoto 2004). - La reestructuración de las plantas de producción de las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja haría de un proyecto de inyección de CO₂ viable desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso y se complementarían haciendo que menos emisiones se depositaran en la atmosfera. - La mayoría de yacimientos del Magdalena Medio, son yacimientos maduros y por lo tanto la etapa de producción primaria ha llegado a su fin o llegará pronto; esto hace atractivo la investigación y desarrollo de proyectos de recobro mejorado EOR que incentiven la inyección de CO₂ en la zona. - Existen varias industrias en diferentes latitudes del país que en determinado momento pueden llegar a suministrar CO₂ para inyección; cementeras, refinerías, termoeléctricas, aserías entre otras.
Fortalezas:	Amenazas:

⁸⁷ Guerrero P. Cindy y Zamora A. Hector I., Evaluación de un proceso de estimulación con CO₂ miscible utilizando simulación numérica, UIS (2011).

<ul style="list-style-type: none"> - Las tecnologías y herramientas para la captación, transporte e inyección de CO₂ estas dadas y solo hay que adaptarlas a la topografía. - Si se promueve el desarrollo de proyectos de inyección en formaciones profundas que no sean de interés petrolero; se posee la disponibilidad técnica, administrativa y de maquinaria y equipo que satisfaga las necesidades de la operación. - Existe el capital humano en Colombia que pueda llevar a cabo los proyectos tanto de captación, transporte y almacenamiento. - Ya se han realizado en Colombia tanto investigaciones como proyectos de inyección de CO₂ con éxito. - Se está comenzando a crear una mentalidad medioambiental que incentiva tanto políticas, investigaciones y proyectos de tipo medioambiental y ello conlleva a complementar a las industrias nacionales con este tipo de proyectos. - Un cambio en la mentalidad hace que surjan todo tipo de situaciones beneficiosas al desarrollo sostenible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de decisión política. - No existen incentivos contundentes para su implementación. - La poca gestión de las entidades gubernamentales hace que no se conozca sobre el tema y no se conozcan las posibilidades para su implementación en el corto mediano y largo plazo. Principalmente en lo referente a la normativa para su implementación. - El precio internacional de crudo hace que proyectos que requieren de un mayor capital puedan verse comprometidos y sobre todo los que tienen que ver con procesos de recobro mejorado de petróleo. - El costo operativo es alto para su aplicabilidad a gran escala, principalmente si no se desarrolla para proyectos EOR y es algo que difícilmente puede controlarse.
---	--

Existen debilidades que no pueden ser superadas fácilmente; como evitar el retorno de CO₂ a la superficie cuando se producen los fluidos, bajar sustancialmente los costos técnico-operacionales y poseer una cronología en cuanto a su utilización en formaciones no petroleras. Sin duda alguna hacer un inventario serio, detallado y puntual de los sitios, cantidad y tipo de emisiones, es algo que debe gestionarse y es una decisión política y administrativa.

Tal vez el último ítem de las oportunidades sea imposible de alcanzar; sin embargo las actividades humanas deben ir creciendo cronológicamente, por lo tanto es importante desarrollar eficientemente lo trabajado, para luego extrapolarlo a las demás industrias y lugares, por lo tanto para seguir con el análisis se descarta este ítem.

Según los ítems que continúan en el análisis puede evidenciarse, que el desarrollo de proyectos de inyección está favorecido para la zona del Magdalena Medio; debido a ello si se lleva a cabo el desarrollo de la ampliación de la refinería de Barrancabermeja ello conllevaría a un mejor flujo disponible para ser inyectado y por lo tanto la viabilidad de los

mismos. La utilización de los bonos de CO₂ es algo que solo debe gestionarse en los proyectos para ser apalancados.

En cuanto a las amenazas. El precio internacional del crudo, la disponibilidad de la materia prima a gran escala y el costo operativo para la implementación son temas tan externos que es difícil manipularlos. El mejoramiento de la gestión política donde se realice una revisión territorial y con ello establezca planes de acciones a favor de los proyectos de inyección principalmente en formaciones no petroleras, debido a que no se encuentra evidencia de su desarrollo en el país, serian temas de gran utilidad para poder superar las amenazas para su desarrollo.

Tabla 27. Matriz estratégica para la captación, transporte y almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas en Colombia.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<p>- Como una estrategia indispensable es que la disponibilidad de CO₂ este cercano a los puntos de utilización; por ello es indispensable que las refinerías, en especial la de Barrancabermeja lleve a feliz término la ampliación y remodelación para abastecer los campos petroleros y poder incentivar tanto la inyección de sus emisiones como el usos en métodos de recobro.</p> <p>- Si el estado se compromete de forma contundente con la normatividad para aplicar proyectos de este tipo y con ello se crearan más y mejores incentivos de los actualmente establecidos, sumado a la gestión de bonos de CO₂ o MDL puede hacer tan viable los proyectos que se comenzarían a expandir de tal forma que el aporte a la reducción de emisiones podría mostrarse como un ejemplo internacional para ser seguido.</p> <p>- Aparte de poder enfocar la inyección de CO₂ en proyectos de recobro mejorado EOR en las zonas principalmente del magdalena medio y cerca de la refinería de Cartagena, la inyección en formaciones no petroleras debería ser implementada como piloto inicialmente en las mismas regiones, debido a la facilidad para su implementación.</p>	<p>- Las primeras zonas en inventariar y mapear las producción de CO₂ en las industrias para poder ser utilizados de manera eficiente y confiable, deben ser las regiones cercanas a la refinería de Barrancabermeja y Cartagena, ya que en estas se encuentran muchas industrias que consumen los hidrocarburos de estas gracias al menor costo en el transporte de los mismos, razón por la cual las mayores emisiones se encuentran en etas zonas.</p> <p>- El gobierno debe incentivar un cambio cultural a nivel territorial referente a la sostenibilidad ambiental no solo desde la parte legislativa, de normatividad y regulatoria sino también del ciudadano de a pie, escuelas, colegios universidades, entes privados y públicos, teniendo en cuenta el protocolo Kyoto (2004) y los incentivos que allí se acordaron referente a los bonos de CO₂ (MDL) entre otras políticas medio ambientales.</p> <p>- Para realizar proyectos de inyección de CO₂ debe estudiarse el flujo máximo permitido que las fuentes de abastecimiento (refinerías entre otras industrias) pueden suministrar con el fin de evitar que los proyectos realizados queden desabastecidos en etapas tempranas de su implementación u optar por la inyección cíclica de los mismos.</p>
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA

<p>- Los organismos de control ambiental deben organizar y planear una manera de obtención de datos que corresponda a las emisiones y donde se ubican con el fin de cuantificarlas e incentivar una mentalidad política que conlleve a los lineamientos, decretos y legislación en general para la implementación de este tipo de proyectos puntualmente, además de generar estímulos para su realización y desarrollo.</p> <p>- Si se implementa una estrategia que permita el cambio de la cultura ambiental a nivel territorial y del estado se lograría que se desarrollaran estudios a gran escala que permitan evaluar estos proyectos y como pueden ser liderados por quienes los desarrollaran.</p>	<p>- De las experiencias que se han obtenido en la investigación e inyección de CO₂ como método de recuperación terciaria de petróleo, debe retroalimentarse a los entes del estado con el fin de evaluar ventajas, desventajas y como estas pueden ser reguladas para mejorar con ello las reglas de juego para su implementación a corto mediano y largo plazo.</p> <p>- Con la investigación y el conocimiento sobre la inyección de CO₂ en formaciones no petroleras que existen en la actualidad y teniendo en cuenta que es factible la aplicación sin una gran transferencia tecnológica la industria debería concertar con el estado y revisar la importancia que tiene a nivel ambiental la inyección de CO₂ bajo este esquema y así realizar conjuntamente este tipo de proyectos; sin duda hay que revisar las fuentes de financiamiento, pues nadie quiere llevar a costas inversiones que no vuelvan a retornar. Pues el retorno de estas actividades son más ambientales que monetarias.</p> <p>- Como los impactos ambientales antropogénicos que ya empiezan a evidenciarse, los gobiernos toman conciencia y las legislaciones empiezan a vislumbrar a favor de una conciencia ambiental que cree incentivos hacia la investigación de políticas y proyectos enfocados en el resguardo del ambiente a través de proyectos de este tipo.</p>
---	---

4.9. ANÁLISIS DOFA PARA LA INYECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO EN FORMACIONES DE INTERÉS ECONÓMICO.

Tabla 28. Matriz DOFA para la inyección y aprovechamiento de aguas de desecho en formaciones de interés económico.

Debilidades:	Oportunidades:
<p>- No existen aún yacimientos de energía geotérmica en explotación en Colombia y por lo tanto eso hace que sea totalmente inviable el uso y aprovechamiento en la actualidad de fuentes de aguas residuales de asentamientos humanos.</p> <p>- En cuanto a la utilización de aguas residuales de asentamientos humanos, no se ha realizado ningún estudio y mucho menos algún proyecto en la región.</p> <p>- Debido a la distancia que deben recorrer los fluidos desde los centros de generación hasta su disposición final, puede</p>	<p>- Existe una disponibilidad de aguas residuales industriales y de asentamientos humanos prácticamente en casi cualquier lugar del territorio colombiano.</p> <p>- El beneficio medioambiental es tan enorme que las licencias para su uso no serían un obstáculo para su realización, aun sin haber reportes de su uso en este sentido, aunque las entidades necesitarían retroalimentarse de reportes hechos en lugares como de Geysers para tomar mejores decisiones.</p> <p>- Si el aprovechamiento se realiza para ser suministrado en</p>

<p>afectar económicamente el proyecto al requerir de grandes capitales para su desarrollo en etapas tempranas.</p> <p>- En proyectos petroleros no es factible sino la reinyección de fluidos producidos de sus propios pozos no existe literatura, ni investigaciones que referencia el uso de aguas de otras fuentes.</p>	<p>yacimientos geotérmicos pueden gestionarse bonos de emisiones de CO₂ que beneficia económicamente los proyectos.</p>
<p>Fortalezas:</p> <p>- En Colombia existe talento humano que pueda adaptar esta tecnología.</p> <p>- Hay suficiente experiencia en el tratamiento y reinyección de aguas de producción en diferentes campos petroleros que actualmente requieren de esta técnica para aumentar los factores de recobro alcanzados con la producción primaria, lo cual es prácticamente lo que se busca, pues en la mayoría de los casos estas aguas antes de ser reinyectadas, simplemente eran productos de deshecho y vertidas a las fuentes hídricas directamente con algún tratamiento neutralizador.</p> <p>- Se posee de recursos geotérmicos en varios lugares del país, donde pueden ser utilizados los vertimientos de deshecho de las poblaciones cercanas.</p>	<p>Amenazas:</p> <p>- No existe legislación puntual sobre el tema.</p> <p>- Si no se desarrolla una industria geotérmica sólida es muy improbable que pueda llegar a darse el desarrollo de esta tecnología.</p> <p>- La existencia de incentivos suficientes para que la realización de estos proyectos sea económicamente rentable comparado con la concesión en cuerpos de agua que normalmente se realizaría cerca a las áreas de utilización.</p>

Tabla 29. Matriz estratégica para la inyección y aprovechamiento de aguas de desecho en formaciones de interés económico.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<p>- Cuando los yacimientos geotérmicos estén en funcionamiento en Colombia, de los cuales ya existen dos proyectos de pre factibilidad, en caso de encontrasen yacimientos de roca caliente seca; las posibilidades de usar aguas de deshecho industrial y humano para la generación eléctrica harían viable su utilización desde el punto de vista ambiental y económico; por lo que las licencias no tendrían mayores inconvenientes. También cabe mencionar que en etapas avanzadas pueda usarse en yacimientos geotérmicos con el fin de compensar las pérdidas por evaporación principalmente si el yacimiento es volumétrico.</p> <p>- Se debe aprovechar el talento humano y la experiencia</p>	<p>- Las empresas que actualmente están desarrollando estudios de implementación de energía geotérmica (ISAGEN S.A) en Colombia, deben evaluar la posibilidad en la utilización de este tipo de tecnología en caso de encontrar roca caliente seca y realizar una evaluación técnico-económica seria para revisar la viabilidad de la misma, así como también un buen análisis de presiones que establezca si el yacimiento se recarga hídricamente o es un yacimiento volumétrico y con ello extrapolar su depletación y planear la necesaria recarga del yacimiento para mantener la presión y volúmenes necesarios.</p> <p>- Para implementar las normativas ambientales, jurídicas,</p>

<p>que se tiene en los yacimientos petroleros donde se usa la reinyección de agua para realizar la planeación y puesta en marcha del uso de aguas de deshecho en yacimientos geotérmicos con el fin de gestionar bonos de CO₂ que apalanquen los proyectos así como la búsqueda de incentivos adicionales.</p>	<p>de incentivos y regulatoria que este tipo de proyectos necesita es importante reunir esfuerzos conjuntos entre centros de investigación, universidades e industria con el fin último de ahondar el tema y las experiencias internacionales y como estas pueden adaptarse a nuestras condiciones, políticas, sociales y ambientales del territorio colombiano.</p> <p>- La utilización de bonos de CO₂ gracias al uso de energías renovables para generar energía eléctrica entre otros beneficios institucionales, no solo sirve para apalancar el costo de transporte desde los centros de generación de aguas servidas e industriales de deshecho sino para llevar a cabo todas las etapas de su investigación y desarrollo y con ello darle mayor viabilidad a los proyectos.</p>
<p>Estrategias Y Acciones DA:</p>	<p>Estrategias Y Acciones FA</p>
<p>- Es muy importante que Colombia se desarrolló geotérmicamente, ya que además de mejorar la canasta energética nacional, se frene el aumento de emisiones de CO₂ y genere una economía alrededor de la misma, se puede desglosar de esta industria tecnología nueva que deba desarrollarse localmente enfocado a proyectos de inyección de aguas de deshecho entre otras actividades.</p> <p>- Los resultados de estudios de la utilización de aguas de deshecho industriales o domesticas para la industria geotérmica sirven para armar los lineamientos para su implementación y desarrollo. Estas deben ser desarrolladas entre los entes privados y públicos a los que compete tal actividad.</p> <p>- De los estudios anteriormente mencionados y gracias al impacto ambiental que representa a favor deben resultar beneficios e incentivos que hagan viabilizar estos proyectos, sin embargo pueda que la llegada de los mismos puedan durar una buena cantidad de tiempo, lapso en el cual no sobra el perfeccionamiento de las investigaciones.</p>	<p>- Con la entrada en funcionamiento de la industria geotérmica en Colombia solo queda consolidarla y con el tiempo indagar donde puede ser aplicada esta tecnología.</p> <p>- Legislación puntual sobre estos temas debe ser desarrollados ya que por un lado tenemos el talento humano y la experiencia en la inyección de fluidos a los yacimientos petroleros y por otra la necesidad de políticas que incentiven esta industria y más especialmente la inyección de fluidos residuo de la industria y de asentamientos humanos que es el tema que tratamos aquí.</p>

4.10. ANÁLISIS DOFA PARA LA EXPLORACIÓN GEOFÍSICA SATELITAL

Tabla 30. Matriz DOFA para la exploración geofísica satelital.

<p>Debilidades:</p>	<p>Oportunidades:</p>
<p>- Existe cierta desconfianza de que este tipo de tecnología funcione realmente.</p>	<p>- La tecnología ya ha sido evaluada con resultados exitosos.</p>

- Los países y sus territorios pueden ser analizados profundamente sin darse cuenta y ello conlleva a estar estratégicamente en desventaja con los países que desarrollan la tecnología.	- Estratégicamente Colombia necesita el hallazgo de nuevas fuentes de hidrocarburos y geotérmica que adicione reservas para la suficiencia energética. - No existen restricciones legislativas para su uso.
Fortalezas:	Amenazas:
- La adquisición de la tecnología representa una disminución en los costos comparado con la exploración sísmica tradicional. - La disminución del impacto ambiental que genera la sísmica tradicional. - La posible reevaluación de reservas existentes y halladas a través de la sísmica tradicional.	- La industria sísmica convencional hará lo necesario para que estas tecnologías no se desarrollen porque destruirá su negocio. - Las políticas nacionales trataran de no acabar con la sísmica convencional de manera definitiva. Ya que la generación de empleo podría verse comprometida. - El mercado para esta tecnología no está preparado para su implementación.

Tabla 31. Matriz estratégica para la exploración geofísica satelital.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
- Para no tener inconvenientes políticos entre el estado y la industria de la sísmica tradicional sería conveniente hacer una transición moderada para la implementación de estas tecnologías vanguardistas y darle una participación en la nueva tecnología donde sus primeros trabajos deberían ser en la reevaluación de las áreas ya cubiertas por la sísmica convencional. - Se necesita de industriales inversionistas que traigan la tecnología y presten el servicio localmente, así se lograra realmente reducir los costos de tener que importarla desde los países de invención. - Hay que sopesar el impacto ambiental con la generación de empleo, sin embargo hay que realizar estrategias para la creación de empleo desde las nuevas tecnologías y/o otras áreas de la geología incluso la sísmica pasiva con dispositivos mucho más sensibles y precisos.	- Se debe revisar la literatura y realizar investigación que corrobore los resultados de su implementación. - Hay que crear un equipo de inteligencia que resguarde confidencialidad digital, electrónica y satelital con el fin de administrar de manera autónoma los recursos sin ser manipulados por potencias externas. - Si el resultado de investigaciones de transferencia de tecnología resulta positivo. Es una buena oportunidad para mitigar los impactos ambientales de la sísmica con tradicional.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
- Las empresas que actualmente prestan el servicio deben ser aliadas en la implementación de estas tecnologías y son ellas las que pueden corroborar la incertidumbre que se tenga con estas tecnologías. Sin embargo la perforación exploratoria debe seguir siendo la herramienta que	- Políticamente siempre debería primar el interés de reducir los impactos ambientales y la generación de empleo es algo que pueda acomodarse con el tiempo. - Las empresas operadoras pueden reducir los costos y los

<p>determine el tipo de yacimiento encontrado.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El estado debe legislar unos lineamientos claros de información confidencial para resguardar la seguridad del estado en cuanto a los recursos que se posee y también hacer las respectivas corroboraciones de su implementación para que sean empleadas por la industria con una trazabilidad administrada por el estado. 	<p>impactos ambientales con su implementación, por lo tanto el estado debe dar garantías para las empresas sísmicas, las cuales con el tiempo sin embargo tenderán a su fin dependiendo de los resultados obtenidos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El estado debe ser contundente de todas maneras en las políticas a la hora de aplicar tecnologías que beneficien al país y sus industrias.
--	---

4.11. ANÁLISIS DOFA PARA LA IMPORTACIÓN DE LEYES EN ENERGÍAS RENOVABLES, LICENCIAMIENTO AMBIENTAL Y SEGUIMIENTO A LOS PROCESOS

Tabla 32. Matriz DOFA para la importación de legislación y parámetros ambientales de regulación y seguimiento.

<p>Debilidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La institucionalidad está acostumbrada a realizar las actividades con determinada monotonía y no están preparadas para cambiar. - Las personas que realmente se sienten comprometidas para realizar cambios significativos son pocas. - La investigación que se lleva a cabo por parte de entidades del estado es muy pobre, por lo general siempre se hace con empresas que hagan los estudios de viabilidad. - La industria y el estado no trabajan conjuntamente con el objetivo de mejorar los procesos. 	<p>Oportunidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Existe un sinnúmero de experiencia positiva que podrían evaluasen para tomar decisiones. - La inconformidad de la empresa privada y otros entes del estado puede ser usado para tomar una dirección de cambio en políticas medioambientales. - La experiencia ha mostrado que los impactos ambientales son irreversibles y por lo tanto debe buscarse nuevas formas de hacer las cosas para mejorar las actuales. - Las energías renovables están en auge a nivel internacional por lo tanto una cooperación internacional es muy factible de encontrarse.
<p>Fortalezas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tenemos una biodiversidad que hay que preservar y cuidar con políticas sanas. - La organización de la estructura administrativa de los recursos ambientales puede generar grandes beneficios de tipo escalonado para implementar políticas nuevas. - La experiencia muestra que siempre se han terminado importando prácticas de otros países para desarrollar políticas en determinadas áreas. 	<p>Amenazas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - El favoritismo político (corrupción) puede filtrarse en quienes intervienen en la elaboración de la norma y eso puede conllevar a problemas irreversibles. - Si el cambio no solo está enfocado en una resolución o decreto, sino que represente el cambio y/o modificación de una ley obviamente debe pasar por la cámara y el senado para su aprobación. - Por más que parezca una buena política no sea conforme a la constitución política colombiana.

Tabla 33. Matriz estratégica para la importación de legislación y parámetros ambientales de regulación y seguimiento.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - De la experiencia regional e internacional siempre debe enfocarse el resguardo de nuestra biodiversidad y por lo tanto solo deben ser evaluadas políticas rigurosas y no permisivas. - Para poder mejorar la respuesta y la información ambiental en los entes del estado hay que contar con toda la estructura administrativa del estado y también a la empresa privada que usa las leyes, sin dejar de lado a la comunidad. - No necesariamente es importar una ley de otro país, lo importante es adaptarla a las condiciones propias y conformar grupos interdisciplinarios que creen mejores cosas basados tanto en las políticas externas, como en las internas y las experiencias. - Aprovechar el auge de las energías renovables y así aumentar la canasta de energética en el país. 	<ul style="list-style-type: none"> - Si las experiencias de las empresas y del estado se unifican en una sola dirección ya sea de carácter nacional, regional o internacional pueden tocarse temas importantes que a la final resultara en el mejoramiento de todo el proceso desde su postulación hasta la entrega de las áreas. - Las personas que laboren en el área ambiental deben tener pasión por lo que hacen y esto debe evaluarse, así como cualquier empresa hace con sus empleados. Estos deben estar dispuestos al cambio y también a generar ideas para mejorar a partir de investigaciones serias que se realicen continuamente de experiencias positivas de cualquier origen. - Los inconformismos siempre traen aspectos positivos al cambiar los elementos que no funcionan por resultados de análisis de experiencias positivas.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<ul style="list-style-type: none"> - La corrupción hay que saberla atacar, por lo tanto la institucionalidad hay que respetarla con leyes que la resguarden y políticas patrióticas, además de cambiar la cultura de estas hacia el cambio y constante actualización. - La transferencia de leyes debe ir acompañada de las experiencias en campo y el amparo en la constitución política. - Si las leyes no tienen conveniencia o favoritismo políticos, es buena y se ajusta a las leyes no habría por que tener en el fin definitivo (su aprobación). 	<ul style="list-style-type: none"> - La seriedad en la elaboración de las políticas debe ser indispensable para que sean aprobadas en la cámara y senado cuando son leyes las cuales siempre deben estar enfocadas en preservar toda la biodiversidad que poseemos. - Las políticas que se importen deben seleccionarse de tal manera que esté acorde con la constitución política colombiana. - Todas las entidades territoriales deben estar vigiladas por la contraloría y la procuraduría para evitar la infiltración de corrupción en las mismas y aprovechar la estructura organizacional enmarcada dentro del ministerio del medio ambiente hacia abajo.

4.12. ANÁLISIS DOFA PARA IMPLEMENTAR EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

Tabla 34. Matriz DOFA para implementar el hidrógeno como combustible.

Debilidades:	Oportunidades:
<ul style="list-style-type: none"> - Combustible secundario: se debe consumir energía para conseguirlo a partir de las distintas materias primas (agua, biomasa, combustibles fósiles) ya que no existe en estado elemental (pero tampoco la gasolina, el gasóleo, el combustible nuclear, etc.). - La densidad energética (Energía/Volumen) requiere tanques de almacenamiento los cuales en el transporte pueden ser grandes y pesados. - Transporte y almacenamiento costosos y de implementación compleja limitado por las temperaturas y presiones requeridas para mantenerlo en estado líquido. - Extremadamente volátil y por lo tanto menos seguro en espacios confinados - Uno de los métodos más prometedores para su obtención es a partir de la electrolisis, sin embargo la energía requerida es todavía costosa para su implementación. 	<ul style="list-style-type: none"> - El hidrógeno al ser el elemento químico más abundante del universo brinda oportunidades energéticas sin igual y se ha usado desde hace muchos años. - Existen numerosos métodos de obtención de los cuales incluso los hidrocarburos podrían ser parte de su materia prima, lo que haría que la conversión se hiciera en un solo lugar y por lo tanto mediante procesos de inyección de CO₂ en formaciones geológicas permitiría la mitigación del medio ambiente, sin embargo las energías renovables también son una fuente de energía que podría abastecer los procesos industriales para su obtención como la electrolisis con el electrolito (agua), entre estas la geotérmica sobresale. - Todas las naciones apuntan a la incentivación de nuevas tecnologías, lo cual genera un ambiente prometedor para el hidrógeno desde el punto de vista técnico, ambiental, económico, legal, político y administrativo.
Fortalezas:	Amenazas:
<ul style="list-style-type: none"> - Ya se encuentran en Colombia empresas dedicadas a la conversión de vehículos híbridos los cuales utilizan tanto combustibles tradicionales con una mezcla de hidrógeno producido en el mismo vehículo mediante la electrolisis. - El producto de su combustión es agua, por lo tanto no contamina (no CO₂), en los motores; no contamina el aceite del motor ni crea ni depósitos ni incrustaciones dentro del motor. - Muy seguro en espacios abiertos. - Las modificaciones a efectuar en los motores convencionales para adaptarlos al hidrógeno son mínimas. - Existe también la tecnología para ser usada su llama. - Las principales empresas automotrices llevan un gran avance en la utilización del hidrógeno como combustible ya sea en su utilización directa, como en las celdas de combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los intereses geopolíticos, geoestratégicos y geoeconómicos son tantos que aunque hace mucho tiempo existen tecnologías que hacen uso del hidrógeno y podrían contribuir a solucionar problemas medioambientales como el calentamiento global, no se ha incentivado suficientemente su investigación y desarrollo y se dice que grandes corporaciones petroleras compran las patentes de los desarrollos en este campo con el fin de que en el eventual y seguro cambio de paradigma energético a futuro, sean ellas las llamadas a mantener el monopolio energético; Shell y la BP serán las compañías que dirigirán el sistema porque tienen ya las patentes de dichas tecnologías renovables. - Los gobiernos corruptos dejan que los intereses de multinacionales o políticas mundiales a través del neoliberalismo sean impuestas y con ello manipulan las políticas mundiales a su antojo.

Tabla 35. Matriz estratégica para implementar el hidrógeno como combustible.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - El hidrógeno es sin duda, gracias a sus fortalezas una fuente de energía indirecta que a mediano plazo será usada masivamente y las naciones deben incentivar su uso y toda su infraestructura ya que el retorno más importante es medioambiental. - En la cronología del uso de combustibles la cadena de carbón viene disminuyendo desde sus inicios, primero con la leña, después con el carbón luego con los combustibles líquidos a temperatura ambiente y posteriormente con el gas metano por lo tanto la dirección apunta que el hidrógeno es la energía que le sigue. - Si los gobiernos y las empresas se enfocan en el cuidado del medio ambiente, lo más sano y seguro es incentivar y aplicar tecnologías que usen el hidrógeno como combustible. Pues el resultado de su combustión es solo agua y energía. 	<ul style="list-style-type: none"> - Buscar fuentes de energía eléctrica económica, confiable y segura ambientalmente son políticas que deben implementarse antes o paralelamente con el uso de hidrógeno como combustible. En este sentido las energías renovables y la eficiencia energética son buenos aliados para cumplir con este objetivo. - Crear centros de investigación no solo para crear nuevas tecnologías en su producción, transporte, almacenamiento y utilización sino también para realizar transferencia de tecnología que pueda fácilmente ser adaptada en Colombia. - Las emisiones de CO₂ van en aumento y solo la humanidad podemos disminuir su celeridad por ello hay que ser más razonables a la hora de buscar, utilizar, producir y administrar energías.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<ul style="list-style-type: none"> - Existen muchas personas y entidades enfocadas en tecnologías ambientalmente sostenibles y de uso de hidrógeno como combustible. En este sentido este grupo social debe integrarse en la política, instrumento de gran utilidad para realizar infinidad de enfoques positivos y razonables. - Independiente de la política, todo interesado debe seguir orientado a seguir investigando y seguir explorando las bondades del hidrógeno y como pueden ser desarrollado principalmente en la producción, almacenamiento, transporte y uso. - Las investigaciones deben buscar al estado para integrar los sectores para desarrollar e incentivar tecnologías innovadoras. 	<ul style="list-style-type: none"> - El uso del hidrógeno como combustible no debe ser una sustitución de los hidrocarburos, los usos híbridos disminuyen considerablemente las emisiones de gases efecto invernadero. - El uso de hidrocarburos como materia prima para su producción es también otra de las alternativas en cuanto al cuidado del medio ambiente, pues si en la producción de hidrógeno en una planta se emite CO₂ y CO estos pueden ser inyectados en formaciones geológicas lo cual ya se ha propuesto en este documento, lo que quiere decir que hay que integrar tecnologías con beneficios medioambientales. - La culturalización en energías renovables y más bien en el cuidado del medio ambiente debe implementarse desde los primeros niveles del sistema educativo, acompañado de incentivar en la población en general el fortalecimiento de las industrias locales las cuales pueden desarrollar tecnologías acorde a las necesidades geográficas y geopolíticas atacando con ello los monopolios o la imposición de otros países mas sagaces y hambrientos de poder.

4.13. ANÁLISIS DOFA PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Tabla 36. Matriz DOFA para la eficiencia energética.

Debilidades:	Oportunidades:
<p>- Las principales tecnologías de eficiencia energética deben ser importadas y adaptadas, en Colombia existe muy poco estudio al respecto.</p> <p>- concientizar a los usuarios, imprescindible para lograr los objetivos de ahorro energético. Por lo que llegar a todos debe ser políticas incluso más allá de la institucionalidad estatal.</p> <p>- La superación del alfabetismo en Colombia no solo debe apuntar a enseñar a leer, escribir, aprender historia y las clases tradicionales, sino que debe enfocarse en el contexto mundial actual. Los impactos antropogénicos y como pueden ser mitigados desde el individuo son temas de suma importancia, sin embargo este tipo de visión no está todavía implementada.</p>	<p>- El aumento inexorable de la población mundial y el creciente uso individual y colectivo de energía supondrán, según la Agencia Internacional de la Energía, duplicar en 2030 la energía consumida en 2004.</p> <p>- La eficiencia energética representa una de las formas más evidentes de creación de valor y terreno muy favorable para la innovación.</p> <p>- El aumento sustancial de la disponibilidad de energía traerá consigo el incremento quizás inaccesible a los más necesitados, razón por la cual la eficiencia energética se muestra como una solución al costo de la misma y al cuidado del medio ambiente.</p> <p>- El potencial de mejora que trae la eficiencia energética es aún enorme e igualmente los beneficios asociados. Recientes informes estiman una importante generación de empleo en la implantación de tecnologías más eficientes tanto en los procesos productivos como en los productos y servicios. La contribución de dichas tecnologías a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y consecuentemente al calentamiento global de origen antrópico es indiscutible.⁸⁸</p>
Fortalezas:	Amenazas:
<p>- Las empresas están más que dispuestas a implementar la eficiencia energética ya que la reducción en costos directos e indirectos son fácilmente evidenciados.</p> <p>- Existen algunas leyes que incentivan la eficiencia energética y las tecnologías que hay que aplicar para su utilización.</p> <p>- Si vemos el lema actual de Ecopetrol “nos reinventamos para competir en el mundo”, podremos escrudiñar que el fondo de estas palabras se enfoca hacia la realización de la operaciones de manera eficiente para reducir los costos y</p>	<p>- Un número creciente de economistas dicen que podría haber aún más emisiones de CO₂ como resultado de algunas mejoras en la eficiencia energética. El problema, como explica John Tierney en The New York Times, es conocido como efecto rebote de la energía. Considerado como un mito por algunos -véase la organización Climate Progress- la afirmación detrás de este efecto es que los ahorros de energía obtenidos gracias a la iluminación eficiente inducen a las personas a consumir más energía de la que antes consumían, generando mayores emisiones de CO₂.⁸⁹ En este mismo sentido podemos ver como los</p>

⁸⁸ Longás, P. Presidente Club de Excelencia en Sostenibilidad, Endesa. España 20.20 (2010).

⁸⁹ Salmerón, M. Puede la eficiencia energética generar mayores emisiones de CO₂ (2012).

mejorar los procesos para mejorar la calidad y tener mejores resultados con precios menos competitivos.	venezolanos al tener combustibles más económicos que los colombianos usan con más insensatez los mismos. ⁹⁰
---	--

Tabla 37. Matriz estratégica de la eficiencia energética.

Análisis cruzado para generar estrategias	
Estrategias Y Acciones FO	Estrategias Y Acciones DO
<ul style="list-style-type: none"> - Sin duda alguna la eficiencia energética tiene la oportunidad absoluta de ser implementada desde las industrias más grandes hasta los hogares en Colombia, esto traerá mejores y más oportunidades económicas, sociales y ambientales. - El ahorro de energía y el mejoramiento de los procesos son temas primordiales, incentiva el crecimiento, además su implementación requiere gran cantidad de personal especializado y técnico que beneficia la generación de empleo a una sociedad hambrienta de energía. - Es difícil encontrar amenazas contundentes que desmotiven la implementación de ciencia y tecnología enfocada a la eficiencia energética. Por lo tanto las empresas y el estado pueden crear políticas que incentiven en mayor forma no solo este tema sino también las energías renovables las cuales caminan de la mano. - Se puede decir que aproximadamente el 90% de las propuestas tecnológicas y legislativas hechas en este documento están enfocadas en el sentido de la optimización de los procesos y la energía razón por la cual el producto de esta investigación es la eficiencia energética. 	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia energética debe ser toda una culturalización. No se le puede dejar este tema solo a unos cuantos, sino que hay que generar una conciencia ambiental y social; y cuando se habla de social no se refiere a implementar el socialismo, sino al cuidado de los recursos que son de todos pero que debido a la cotidianidad en su uso quizás se ignora y no lo sé valora (aire, agua y tierra). - En este mismo sentido las políticas y su institucionalidad en compañía de las principales empresas energéticas son las encargadas de incentivar la investigación, desarrollo e implementación de la eficiencia energética como punto focal de sostenibilidad.
Estrategias Y Acciones DA:	Estrategias Y Acciones FA
<ul style="list-style-type: none"> - Como la investigación es la base del conocimiento, analizar la amenaza relacionada con el mayor consumo de energía debido a la eficiencia energética con estudios realizados con la misma comunidad por su aspecto social político y económico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mientras nos ponemos a pensar o evaluar si la eficiencia energética trae consigo mayor consumo de energía, hay que trabajar y avanzar para desarrollar políticas, tecnologías y aplicaciones que conlleven la eficiencia energética como filosofía.

⁹⁰ Expresidente Hugo Chávez. Correo del Orinoco, artillería del pensamiento. Derroche de gasolina en Venezuela llega a 300 mil barriles por día (2012).

5. DESCRIPCIÓN DE LAS OPORTUNIDADES PARA IMPLEMENTAR TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA ENTRE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA Y DE LOS HIDROCARBUROS EN COLOMBIA

En este capítulo se describirán las oportunidades que en Colombia puede darse como resultado del análisis de las estrategias y acciones presentadas en la matriz DOFA. Para esta descripción se tendrá en cuenta los beneficios técnicos, económicos y legales que puedan afectar de manera positiva la aplicación de los mismos.

Algunas propuestas realizadas no pueden ser ejecutadas actualmente debido principalmente a amenazas contundentes que no pueden ser controladas, razón por la cual no significa que en un futuro cambien estas limitaciones y puedan volver a evaluarse y ello conlleve a la oportunidad de poder ser desarrolladas. En este sentido se expondrá inicialmente aquellas opciones:

La inyección de CO₂ en formaciones geológicas tiene varios obstáculos; no se cuenta con un inventario y mapeo de la producción de CO₂ y por lo tanto es difícil realizar estudios serios y comprometidos.

La ampliación y remodelación de la refinería de Barrancabermeja no se ha hecho, factor que impacta negativamente este tipo de proyectos en cuanto a la disponibilidad de CO₂ en mega proyectos de este tipo, incluso aquí se habló del cierre de pilotos de inyección debido a la disponibilidad del mismo.

La inyección de CO₂ en formaciones no petroleras no posee investigación local y necesita de grandes estímulos para poder implementarse debido a las grandes inversiones que debe hacerse y que no pueden esperarse retornos de esta actividad. Pues el retorno es de tipo medioambiental.

Queda abierta la posibilidad de mejorar la disponibilidad de CO₂ y con ello realizar proyectos de recobro mejorado y. También de mejorar los incentivos y las investigaciones para realizar estas inyecciones en formaciones no petroleras.

Inyección y aprovechamiento de aguas de desecho en formaciones de interés económico, tiene dos amenazas insostenibles: La industria petrolera no está, ni estará interesada en este tipo de tecnología ya que le es más fácil y económico la concesión del recurso in situ. Sin la existencia de la energía geotérmica en el país, la cual debido a la experiencia internacional sería la que utilizaría esta tecnología, sin embargo habría que esperar a que esta industria se consolide y sienta la necesidad de poderlo utilizar, para lo cual en compañía del estado y de incentivos amplios pueda llevarse a implementar más adelante.

Pues si bien la industria se consolide, solo será hasta la disminución de la carga hídrica de un yacimiento volumétrico o el descubrimiento basado en roca caliente seca que se necesite como tal una recarga extra que pueda viabilizar esta tecnología.

A continuación se describen las oportunidades para transferir tecnologías y políticas de regulación ambiental que puedan ser aplicadas en Colombia:

Tabla 38. Oportunidades para desarrollar transferencia de tecnología en Colombia.

TECNOLOGÍA	OPORTUNIDADES
<p>exploración geofísica satelital</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La adquisición de la tecnología representa una disminución en los costos comparado con la exploración sísmica tradicional. - La tecnología ya ha sido evaluada con resultados exitosos. - Las empresas operadoras pueden reducir los costos y los impactos ambientales con su implementación, por lo tanto el estado debe dar garantías para las empresas sísmicas, las cuales con el tiempo sin embargo tenderán a su fin dependiendo de los resultados obtenidos. - Estratégicamente Colombia necesita el hallazgo de nuevas fuentes de hidrocarburos y geotérmica que adicione reservas para la suficiencia energética. - No existen restricciones legislativas para su uso. - La utilización de la tecnología favorece positivamente los impactos ambientales generados por la sísmica convencional. - El estado debe regular su uso para no tener inconvenientes administrativos.
<p>Sísmica pasiva usada en la caracterización de yacimientos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Por medio del uso de la microsismicidad de la Tierra se pueden obtener datos sumamente importantes para complementar los modelos numéricos de caracterización de los campos petroleros disminuyendo la incertidumbre en estos sin la necesidad de invertir grandes sumas de dinero. - Esta técnica permite identificar la producción e inyección vías de alta

<p>petroleros en Colombia: Caso Puerto Gaitán, Cusiana y Cupiagua.</p>	<p>transmisibilidad inducida y sus variaciones temporales, y la imagen de la orientación, la extensión, la complejidad, y el crecimiento temporal de las fracturas hidráulicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Usar la red sismológica nacional con el propósito de hacer estudios de prospección sísmica sin recurrir al uso de la sísmica activa evitaría demasiadas molestias a las comunidades aledañas.
<p>Modelo 3D hidrogeológico y geo mecánico para el mejoramiento de un sistema geotérmico en The Geyser en California.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Convertirse en un futuro un modelo ejemplo para aplicarlo en la caracterización de este tipo de yacimientos en este país ya que empresas como ISAGEN tiene proyectado en su plan de proyectos corporativo la explotación de este tipo de yacimientos con el fin de diversificar su portafolio energético. - Este modelo tiene el potencial de adaptarse a la simulación de acuíferos asociados a los yacimientos petroleros para determinar los futuros rendimientos y comportamientos de todo el sistema geológico de hidrocarburos. - Aprovechar la etapa de desarrollo del campo geotérmico en cercanías del Nevado del Ruiz con el fin de combinar esfuerzos entre ISAGEN y grupos de investigación del país que diseñen estrategias de evaluación de los modelos aprovechando la información recolectado en las diferentes etapas del prospecto con el fin de mejorar los futuros proyectos geotérmicos en el país. - Incentivar a las empresas petroleras para que inviertan un poco más de esfuerzos para usar este tipo de modelos con el fin de caracterizar acuíferos asociados a yacimientos petroleros y acoplarlos con la simulación total de un sistema petrolífero.
<p>Una optimización eficiente de ubicación de los pozos y el control para una prospección geotérmica bajo incertidumbre geológica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Comprender y maximizar la rentabilidad de la operación de producción en etapas tempranas del desarrollo del campo. - Este enfoque de optimización también se puede utilizar para gestionar otras operaciones de recursos geológicos, tales como la producción de hidrocarburos o de secuestro de CO₂, bajo condiciones de yacimiento inciertos. - Se puede evaluar el efecto sobre la producción de hidrocarburos que tienen los acuíferos activos en un sistema petrolero bajo incertidumbre geológica por medio de un modelo hidrogeológico.
	<ul style="list-style-type: none"> - Explotar activos de empresas petroleras que se creían no tenían ya ningún valor como son los pozos petroleros abandonados. - Proveer de autosuficiencia energética a los campos petroleros que cuenten con el

<p style="text-align: center;">Energía geotérmica a partir de pozos petroleros abandonados.</p>	<p>recurso aplicando políticas más amigables con el medio ambiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diversificar el portafolio de tecnologías por parte de las operadoras que lleve a cabo este tipo de proyectos con el fin de crear sinergia entre la industria petrolera y la geotérmica. - Existe un gran potencial de optimizar el proceso por medio del ajuste y optimización de los parámetros de operación tales como el comportamiento termodinámico del fluido inyectado así como el usado en el ciclo Rankine, variables de diseño de los equipos, etc. con el fin de obtener mejores eficiencias energéticas. - Construir un mapeo de la distribución y el número de pozos abandonados en el país con su respectivo gradiente geotérmico con el fin de facilitar a empresas del sector geotérmico así como petroleros la evaluación de futuros proyectos de generación eléctrica aprovechando este recurso valioso para los colombianos. - Aplicar a los bonos de CO₂ y demás beneficios tributarios y arancelarios a los cuales este tipo de proyectos tienen derecho a participar. Por medio de este tipo de incentivos se puede gestionar parte de su financiamiento con el fin de volverse una fuente de energía eléctrica competitiva a nivel regional y nacional.
<p style="text-align: center;">Importación de leyes en energías renovables, licenciamiento ambiental y seguimiento a los procesos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Existe un sinnúmero de experiencia positiva que podrían evaluar para tomar decisiones de implementación. - Quizás, algunos aspectos por emular de las prácticas internacionales exitosas son la planificación del desarrollo inclusivo, participativo, holístico y de largo plazo, no inmediatista; y el manejo total del tema ambiental desde el Estado, incluyendo hasta la realización de las evaluaciones ambientales estratégicas y los diagnósticos ambientales de alternativas - Podrá adoptarse de alguna manera particular y ajustada acorde con las condiciones ambientales, políticas, económicas y sociales propias de Colombia algunos de los lineamientos internacionales que siempre apunten al mejoramiento y robustez de las licencias ambientales y su seguimiento en su etapa de operación en los planes de manejo ambiental. - Los países europeos van al frente en cuanto a legislaciones a favor de las energías renovables. En los EE.UU. - Existen varios países enfocados más en el seguimiento a los proyectos que en sus etapas tempranas o de pre factibilidad, para ello hay que adoptar medidas que aseguren la disponibilidad técnica de cada región de manera detallada y una estandarización de los proyectos que se licencian.

<p>Aprovechamiento de pozos abandonados de la industria de hidrocarburos en Colombia y el beneficio de su energía geotérmica enfocado hacia el recobro mejorado de petróleo y/o cogeneración eléctrica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Las inversiones que se realizan en cuanto a los pozos petroleros son tan altas que la utilización económica después de tenerlos en desuso es un gran aliciente que apunta a los activos de cualquier empresa. - Hay que aprovechar todo el conocimiento técnico, la voluntad de reinversión y administrativa que apunta hacia la eficiencia energética, ya que este tipo de proyectos ahorraría mucho dinero y podría reducir sustancialmente el lifting cost de los crudos pesados. - La disponibilidad de pozos abandonados en Colombia supone un gran aliciente para que la voluntad de reinversión apueste por tecnologías innovadoras, más aun donde puede adicionarse el beneficio medio-ambiental. - Los procesos de recobro mejorado pueden integrar su viabilidad con estrategias que busquen estos recursos pudiendo con ello controlar toda la cadena de su utilización y aprovechamiento, ya sea la recuperación terciaria de petróleo o incluso también en el tratamiento de deshidratación del crudo y la generación eléctrica.
<p>Hidrógeno como combustible.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El hidrógeno es sin duda, gracias a sus fortalezas una fuente de energía indirecta que a mediano plazo será usada masivamente y las naciones deben incentivar su uso y toda su infraestructura ya que el retorno más importante es medioambiental. - Todas las naciones apuntan a la incentivación de nuevas tecnologías energéticas lo cual genera un ambiente prometedor para el hidrógeno desde el punto de vista técnico, ambiental, económico, legal, político y administrativo. - En la cronología del uso de combustibles la cadena de carbón viene disminuyendo desde sus inicios, primero con la leja, después con el carbón luego con los combustibles líquidos a temperatura ambiente y posteriormente con el gas metano por lo tanto la dirección apunta que el hidrógeno es la energía que le sigue. - Si los gobiernos y las empresas se enfocan en el cuidado del medio ambiente, lo más sano y seguro es incentivar y aplicar tecnologías que usen el hidrógeno como combustible. Pues el resultado de su combustión es solo agua y energía.
<p>Eficiencia</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sin duda alguna la eficiencia energética tiene la oportunidad absoluta de ser implementada desde las industrias más grandes hasta los hogares en Colombia, esto traerá mejores y más oportunidades económicas, sociales y ambientales. - El ahorro de energía y el mejoramiento de los procesos son temas primordiales para cualquier empresa, pues reduce costos de producción e incentiva el crecimiento de las mismas, además su implementación requiere gran cantidad de personal especializado y técnico que beneficia la generación de empleo a una

<p>energética</p>	<p>sociedad hambrienta de energía.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es difícil encontrar amenazas contundentes que desmotiven la implementación de ciencia y tecnología enfocada a la eficiencia energética. Por lo tanto las empresas y el estado pueden crear políticas que incentiven en mayor forma no solo este tema sino también las energías renovables las cuales caminan de la mano. - Se puede decir que aproximadamente el 90% de las propuestas tecnológicas y legislativas hechas en este documento están enfocadas en el sentido de la optimización de los procesos y la energía razón por la cual el producto de esta investigación es la eficiencia energética.
<p>Ciclo orgánico Rankine y el ciclo Kalina.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Existen campos petroleros en Colombia como Apiay, Castilla, Suria con gradientes geotérmicos anormales los cuales presentan pozos con altos cortes de agua aprovechables para aplicar este tipo de tecnologías. - Estos proyectos pueden hacer uso de los bonos de emisiones de CO₂, los beneficios tributarios y arancelarios otorgados por el estatuto tributario y la ley 1715 del 13 de mayo del 2014 que en complemento con los ahorros de costos representados en los pozos petroleros ya existentes usados para la explotación geotérmica reducen la inversión en más de un 50% de su costo inicial comparado con un proyecto de geotermia convencional. Esto genera altos rendimientos económicos reflejados en retornos en menor tiempo de la inversión (TIR). - El sistema aumenta la eficiencia energética del campo petrolero explotando la energía en forma de calor de los productos de producción que antes no se estaba aprovechando. Los campos al tener la oportunidad de producir su propio suministro eléctrico dejan de exponerse a los constantes corte energéticos lo cual disminuye los diferidos de producción ya expuesto en el análisis de la matriz DOFA. - En Colombia existe un talento humano con formación académica idónea como lo son los ingenieros de petróleos, químicos, mecánicos, eléctricos y electrónicos entre otros que cuentan con la destreza de llevar a cabo este tipo de proyectos a buen término. - Cabe resaltar que ya existen referencias a nivel mundial de proyectos vigentes que se pueden consultar para complementar el proceso de aprendizaje en Colombia disminuyendo así tiempo y esfuerzos en vías de obtener mejores resultados. Uno de esos estudios rigurosos fue llevados a cabo en China en el campo petrolero de Huabei en donde funciona un modelo piloto de este tipo el cual ha dado muy buenos resultados en el tiempo. Además en Colombia existe la voluntad de probar el COR en el Piedemonte Llanero por parte de las directivas de Ecopetrol como plan estratégico de autoabastecimiento de energía eléctrica. - Ecopetrol ha contratado un estudio de pre factibilidad técnico-económica con la

	<p>multinacional Polaris Energy Corporation, para definir la posibilidad de tener disponibles 5 megavatios en la Superintendencia de Apiay.</p>
<p>Tecnología de perforación de circulación en reversa de Gas-lift:</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aprovechamiento de los proyectos actuales geotérmicos en Colombia como el llevado a cabo en el Nevado del Ruiz con el fin de probar este mecanismo de perforación y así obtener las primeras experiencias en el país en las formaciones y condiciones propias a nuestra geología local con el objetivo de aprender de estas y comenzar a construir mejores planes de perforación para los siguientes prospectos profundizando en diferentes tipos de técnicas de perforación de Gas-lift. - Es un método que ha probado obtener excelentes desempeños para la adquisición de corazones en proyectos de prospección estratigráfica debido a su alta tasa de perforación que disminuyen el número de corridas. - Por medio de los servicios que empresas como Halliburton, Schlumberger y otras más del ámbito internacional el país puede explorar esta técnica de perforación con todo el soporte técnico que estas compañías ofrecen para obtener los mejores resultados en las áreas de interés y así diversificar las opciones de perforación que mejor se adapten a cada situación. - Por medio de la capacitación de personal de las empresas nacionales del sector energético como Ecopetrol e ISAGEN sobre el uso de la perforación Gas-lift y otras tecnologías de perforación no convencionales se promueve un conocimiento más detallado y técnico que permite a las compañías operadores del país contratar este tipo de servicios en los casos específicos que sean verdaderamente necesarios valorado ya sea por medio de cualquier mecanismo evaluativo. Además los grupos de investigación tanto del sector privado así como del sector académico pueden desarrollar en conjunto modelos que permitan evaluar el desempeño de esta tecnología y con ello poder optimizarla para des limitar las restricciones observadas en la práctica.
<p>Procesos de tratamiento de los fluidos de producción en un campo geotérmico</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Amplia variedad de tratamientos para todo tipo de composiciones químicas de los fluidos de producción petroleros y geotérmicos que soportan una extensa gama de exigencias operacionales según el requerimiento de los diferentes proyectos en el país. - El uso de estos métodos no se limitan solo a los proyectos geotérmicos sino también a un amplio campo de acción en el sector petrolero ya que se basan en principios científicos adaptables a un sinnúmero de escenarios en campos de todo el ámbito nacional.

6. CONCLUSIONES

La transferencia de tecnología puede entenderse como el aprovechamiento práctico del conocimiento científico entre industrias, empresas, el estado, las universidades y centros de investigación obtenido a partir de los procesos de investigación y desarrollo.

El estado está rezagado en términos de normatividad e incentivos que viabilicen el desarrollo de la mayoría de las tecnologías propuestas y por lo tanto debe actualizarse y desarrollar mecanismos para nivelarse con la innovación mundial concerniente al desarrollo sostenible y las energías renovables principalmente.

La energía geotérmica y la industria de los hidrocarburos son industrias que se complementan; usan en la parte técnica del upstream todas las etapas: exploración, análisis de yacimientos, perforación, completamiento y facilidades. Debido a ello debía haber una sinergia más participativa desde las universidades hasta la industria y ello haría que por una parte los egresados ingenieros de petróleo ampliaran su currículo laboral y la industria diversificara su canasta de servicios o incluso pueden ser operadores del campo geotérmico.

Las energías renovables aumentan la disponibilidad energética e incentivan la protección y el cuidado de los recursos naturales y del ambiente.

La eficiencia energética y de los recursos son una especialidad de la ingeniería que todas las industrias deben aplicar con el fin de mejorar sus procesos y disminuir costos adicionales prácticamente invisible.

El resultado de esta investigación solo abre las puertas a una diversidad de propuestas que necesitan buena investigación ya que la mayoría de estas tecnologías están en una etapa incipiente de desarrollo. Aproximadamente el 90% o más de los planteamientos en este trabajo tienen un enfoque medioambiental, de eficiencia energética y/o de sostenibilidad por lo cual se invita a seguir esta dirección y que este trabajo ayude a la orientación de sus interesados.

7. RECOMENDACIONES

A partir de este trabajo se pueden realizar varios proyectos de investigación que profundicen cada una de las propuestas tecnológicas hechas encaminadas a la implementación puntual y la realización de la viabilidad técnico-económica de su ejecución.

Se recomienda abordar en estudios futuros, el análisis de la implementación de proyectos geotérmicos en campos de petróleo con pozos abandonados, para la producción de electricidad utilizando la infraestructura existente. Adicionalmente, las tecnologías de extracción de petróleo podrían ser utilizadas para la reingeniería de reservorios, en los denominados Enhanced Geothermal Systems (EGS)

BIBLIOGRAFIA

- ✓ AMÉRICO p. Hernán et. al. Hidrógeno, combustible del futuro: ¿por qué, cómo y dónde?. Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica (2011).
- ✓ ALIMONTI, C. Gnoni, A. Harnessing the fluids heat to improve mature oil field: the VillafortunaeTrecate case study, J. Petrol. Sci. Eng. 125 (2015).
- ✓ ALIMONTI, C. Soldo, E. Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger (2014).
- ✓ BEASLEY, C. Et al. Schlumberger. Oilfield review volume 21, no 4. Aprovechamiento del color de la Tierra. D.C. (2010).
- ✓ Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo. Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad (2013).
- ✓ BERT, LE. Evaluación de la energía geotérmica en México. Inter-américa Development Bank, México (2011).
- ✓ BERT, M. Ogunlade, D. Coninck, H. Loos, M. Leo, M. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Informe especial del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. ISBN 92-9169-319-7. (2005).
- ✓ BU, X. Ma, W. Li, H. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells (2011).
- ✓ CENGEL, Y. BOLES, M. Termodinámica. MC Graw Hill, Sexta Edición, México, D.F. (2009).
- ✓ CHEN, M. Tompson, A. Mellors, R. Abdalla O. An efficient optimization of well placement and control for a geothermal prospect under geological uncertainty (2014).
- ✓ CHENG, W. Li, T. Nian, Y. Xie, K. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells (2014).

- ✓ DASILVA, A. Gomez, Y. Villa, M.A. Yoris, F., Morales, D. Oil distribution in the Carbonera formation, Arenas Basales unit. A case study in the Quifa and Rubiales (2014).
- ✓ DAVIS, A. Michaelides, E. Geothermal power production from abandoned oil wells, Energy 34 (2009).
- ✓ Dirección General de Industria y energía y minas. Aplicaciones actuales de la energía geotérmica, México (2005).
- ✓ DNP; evaluación de operaciones al proceso de licenciamiento ambiental en sus etapas de planeación, evaluación y seguimiento, desarrollados por las entidades encargadas del sector, los peticionarios y las autoridades ambientales; informe final ard-426-doc. 12; Bogotá D.C. (2013).
- ✓ FINSTER, M. Clark, C. Schroeder, J. Martino, L. Geothermal produced fluids: Characteristics, treatment technologies, and management options. (2015).
- ✓ FU, W. Zhang, J. Lu, Z, Performance evaluation of Kalina cycle subsystem on geothermal power generation in the oilfield. (2013).
- ✓ GOMEZ, Alba. S. Fajardo, C. Vargas, C. Stress field estimation based on focal mechanisms and back projected imaging in the Eastern Llanos Basin (Colombia) (2015).
- ✓ GUERRERO, C. Zamora, H. Evaluación de un proceso de estimulación con CO₂ miscible utilizando simulación numérica, UIS (2011).
- ✓ ISAGEN., Desarrollo Geotérmico en Colombia avances. WEC-COCME II Jornada Técnica Medellín-Colombia. (2012).
- ✓ JEREMY Rifkin. La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra. Barcelona: Editorial Paidós, (2002).
- ✓ KAGEL, A. Bates, B. Gawell, G. A Guide to Geothermal Energy and the Environment. Geothermal Energy Association, 209 Pennsylvania Avenue SE, Washington, D.C. (2003).
- ✓ KEN Arnold Volumen 2, 2ª edición (1999).

- ✓ LI, Ch. Nian, Y. Wang, C. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells, Energy 59 (2013).
- ✓ LI, Guillermo. Angulo, R. Guía de la Energía Geotérmica, Comunidad de Madrid España (2007).
- ✓ LI, T. Zhu, J. Zhang, W. Cascade utilization of low temperature geothermal water in oilfield combined power generation, gathering heat tracing and oil recovery (2014).
- ✓ LINARES H. José I. Moratilla, B. Instituto de la energía de España. Colección: avances de ingeniería. Análisis situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas. El hidrógeno y la energía (2007).
- ✓ LINGYU Zhang, Peking U., Mingsheng Liu, Huabei Oilfield Co., PetroChina, Kewen Li*, SPE, Peking U. and Stanford U. 2009 SPE Western Regional Meeting held in San Jose, California, USA. Estimation of Geothermal Reserves in Oil and Gas Reservoirs. SPE 210031. (2009).
- ✓ LINGYU Zhang, at el. 2008 SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition held in Perth, Australia. Energy from Abandoned Oil and Gas Reservoirs. SPE 115055.(2008).
- ✓ LINGYU Zhang, at el. SPE Western Regional Meeting held in San Jose. Estimation of Geothermal Reserves in Oil and Gas Reservoirs. SPE 120031 (2009).
- ✓ LONGÁS, P. Presidente Club de Excelencia en Sostenibilidad, Endesa. España 20.20 (2010).
- ✓ LÓPEZ, V. Ana. Instituto Politécnico Nacional; Estudio para disposición final de residuos peligrosos líquidos en formaciones geológicas estables; México; (2007).
- ✓ MELINDER, A. Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working, Doctoral Thesis, (2007).
- ✓ METZ, B et al. Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2005).
- ✓ MOHAMMED S. et al. A Literature Survey of the Fracking Economic and Environmental Implications in the United States. (2015).

- ✓ MORENO, C. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), La Habana, Cuba. Leyes para las energías renovables en América Latina y el Caribe (2013).
- ✓ NALLA, G. Shook, G. Mines, G. Bloomfield, K. Parametric sensitivity study of operating and design variables in wellbore heat exchangers, Geothermics (2005).
- ✓ NOOROLLAHI, Y. Pourarshad, M. Jalilinasrabad, S. Yousefi, H. Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oilfield in southern Iran (2014).
- ✓ OSORIO, G. Penuela, G. Otalora, O. Correlation Between Microseismicity and Reservoir Dynamics in a Tectonically Active Area of Colombia (2008).
- ✓ PÉREZ, E. La energía geotérmica en Colombia: el caso del macizo volcánico del Ruiz., Foro: Fuentes de Energías Alternativas, Medellín Colombia (2006).
- ✓ PÉREZ, M. Calderón, Z. Orientaciones prácticas para la elaboración exitosa de trabajos de grado en ingeniería. División de publicaciones UIS, primera edición, Colombia, (2011).
- ✓ PIÑEROS, L. Alberto, L. Estudio técnico-económico para determinar la factibilidad de la implementación de unidades de generación energía eléctrica a partir de fuentes solar térmica y geotérmica. Trabajo de Grado Colombia, UIS (2009).
- ✓ RAÚL R. Prando. La captura y el almacenamiento del dióxido de carbono, CAC. Una herramienta de mitigación del cambio climático. Academia Nacional de Ingeniería, Uruguay. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. Uruguay. (2011).
- ✓ RIFKIN, J. La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra. Barcelona: Editorial Paidós (2002).
- ✓ SALMERÓN, M. Puede la eficiencia energética generar mayores emisiones de CO₂ (2012).
- ✓ SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition held in Perth, Australia. Energy from Abandoned Oil and Gas Reservoirs. SPE 115055. (2008).
- ✓ TEMPLETON, J.D. Ghoreishi-Madiseh, S.A. Hassani, F. Al-Khawaja, M.J. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal, Energy 70 (2014).

- ✓ U.S. Department of Energy. Geothermal today. Energy Efficiency and Renewable Energy, Estado Unidos (2003).
- ✓ VISINTIN A. Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas- INIFTA, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. hidrógeno, combustible del futuro: ¿por qué, cómo y dónde?. (2011).
- ✓ VV.AA, The Future of Geothermal Energy e Impact of Enhanced Geothermal System (EGS) on the United States in the 21th Century, MIT-Massachusetts Institute of Technology, USA. (2006).
- ✓ XIUMIN, M. Yue, Y. Luheng, Q. Research and Application of Gas-lift Reverse Circulation Drilling Technology to Geothermal Well Construction in Dalian Jiaoliu Island. (2014).
- ✓ YONGA, Z. Jianliang, Z. Technical Improvements and Application of Air-lift Reverse Circulation Drilling Technology to Ultra-deep Geothermal Well. (2014).