



Cinvestav

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD SALTILLO**

**SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y
ENERGÍA**

Evaluación del Aprovechamiento Sustentable del Gas Shale en México

TESIS

que presenta

JOSUE CAMILO SANCHEZ GONZALEZ

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y ENERGIA

Directora de Tesis:

MARIA DE LOURDES VIRGINIA DIAZ JIMENEZ

Ramos Arizpe, Coahuila

Octubre de 2018

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) le agradezco por el apoyo recibido durante mi estancia en la maestría para la realización de este proyecto.

Al Fondo Conacyt-Sener-Hidrocarburos a través del proyecto 267962 por el apoyo financiero para el desarrollo de esta investigación.

Al Cinvestav Unidad Saltillo, por acogerme en sus instalaciones y permitirme desarrollar un proyecto contando con su apoyo.

A mi asesora de tesis, la doctora María de Lourdes Virginia Díaz Jiménez, por su apoyo y guía durante la realización de este proyecto, además de su gran paciencia en la conclusión del mismo.

A mi jurado revisor, por tomarse el tiempo de leer y atender este documento.

Contenido

Agradecimientos.....	i
Contenido.....	ii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
1. Introducción	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 Gas Shale.....	3
2.2 Extracción del gas Shale	4
2.3 Potencial del gas Shale.....	9
2.4 Retos del gas Shale	10
2.5 Gas Shale en México	13
2.6 Análisis de Ciclo de Vida	15
3. Justificación	22
4. Objetivos	23
4.1 Objetivo general	23
4.2 Objetivos particulares.....	23
5. Metodología	24
5.1 Enfoque basado en la Inteligencia Tecnológica.....	24
5.1.1 Fuentes de información científica	24
5.1.2 Fuentes de información tecnológica.....	25
5.2 Evaluación de impacto ambiental.....	26
5.2.1 Supuestos de modelado y límites del sistema	26
5.2.2 Inventario del ACV.....	26
5.2.3 Evaluación de impactos	27
5.3 Creación de propuestas de desarrollo	28
6. Resultados y Discusión.....	29
6.1 Análisis de Inteligencia Tecnológica.....	29
6.1.1 Información Científica.....	29
6.1.2 Información Tecnológica.....	36
6.2 Evaluación de impacto ambiental.....	40
6.2.1 Objetivo y alcance del ACV	40
6.2.2 Inventario ACV	41

6.2.3 Evaluación de impactos	43
6.2.4 Interpretación de resultados	44
6.2.5 Discusión de resultados.....	55
6.3 Propuestas de desarrollo.....	57
7. Conclusiones	59
8. Trabajo futuro.....	60
9. Referencias.....	61

Resumen

El excesivo y mal uso de los combustibles fósiles ha ocasionado que sus reservas vayan en disminución, por lo que es necesario aprovechar estos recursos de manera óptima buscando reducir el impacto que puedan tener sobre el medio ambiente. El gas Shale es una fuente relativamente nueva para la producción de energía. Sin embargo, debido a que el proceso de fractura hidráulica, necesario para su extracción, puede presentar efectos adversos al ambiente, su aprovechamiento no ha sido posible en varios países, como en México. Por lo anterior, es necesario realizar un estudio sobre el impacto ambiental de los procesos involucrados en la extracción del gas Shale, con lo cual se puedan identificar las áreas de oportunidad que existen para su explotación, bajo una perspectiva de desarrollo sustentable. En este trabajo se realizó un análisis de Información Tecnológica para detectar áreas de desarrollo, además de conocer la relevancia que tiene el gas Shale tanto en el campo científico como en el tecnológico. También se empleó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para identificar los impactos prospectivos generados durante cada etapa del proceso de extracción del gas Shale. Se encontró que el tópico sobre el gas Shale es de importancia en la actualidad, principalmente por la preocupación por el agotamiento del petróleo. Además, a partir del ACV, se encontró que el diésel y los compuestos químicos son los insumos que mayor impacto ambiental producen, mientras que otros tienen impacto al ambiente debido a sus procesos de producción. De esto último se pueden proponer algunas alternativas que disminuyan los impactos al ambiente, como emplear cementos alternativos, los cuales tienen una repercusión menor al cemento convencional, así como emplear parte del gas obtenido para disminuir el empleo de diésel en el proceso de extracción.

Abstract

The wrong and excessive use of fossil fuels has caused their reserves to decrease, so it is necessary to take advantage of them in an optimal way without great damages to the environment. Shale gas is a relatively new source for energy production, but due to the necessary process to extract it, the hydraulic fracture, as well as the possible adverse effects on the environment; its development hasn't been possible in many countries, like Mexico. Due to this situation, it is necessary to carry out a study about the environmental impact of the processes involved in the extraction of Shale gas, to identify the opportunity areas for its exploitation, under a sustainable development perspective. In this work, a Technological Information analysis was done to detect development areas, besides to know the scientific and technologic relevance about Shale gas. A Life Cycle Assessment (LCA) was also used to identify the impacts generated in each stage of the Shale gas extraction process. It was found that the Shale gas topic is of importance nowadays due to the concern about oil depletion. In addition, from the LCA, it was found that diesel and chemical compounds are the inputs that produce the greatest environmental impact, while others have an impact due to their production process. From this, some alternatives can be proposed to reduce environmental impacts, such as the use of alternative cements, which have a lower impact than the conventional cements, as well as using some of the gas obtained to reduce the use of diesel in the extraction process.

1. Introducción

Los combustibles fósiles han desempeñado un papel importante en el mundo ya que gracias a ellos ha sido posible el abastecimiento de energía a través de procesos relativamente sencillos a un costo accesible. Conforme han transcurrido los años, la necesidad de energía se ha incrementado y se estima que esta necesidad irá en aumento en el futuro. Esto debido principalmente al crecimiento de la población mundial, al desarrollo de la tecnología y a las altas expectativas en el buen vivir [1, 2].

En este contexto, el gas natural presenta una oportunidad de desarrollo para abastecer la demanda energética. Es una fuente de combustión más limpia en comparación con el petróleo y carbón, ya que genera menos emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera [3, 4]. El gas no convencional, conocido como gas Shale, se ha posicionado recientemente como una fuente de gas natural con posibilidades de reemplazar otras fuentes para la producción de energía. La explotación de gas Shale ha sido posible debido al desarrollo tecnológico y al empleo de mejores prácticas extractivas; anteriormente su extracción resultaba no viable económicamente, además de generar daños ambientales por la falta de barreras de protección y técnicas de perforación adecuadas. Análisis recientes predicen que el gas Shale proveerá los recursos suficientes para la producción de energía, ya que posee una amplia distribución en varios países. Lo anterior ha generado un interés en su rápida explotación y desarrollo, bajo una perspectiva de ser sustentable y socialmente responsable para evitar el mal empleo de este recurso [5-7].

El desarrollo del gas Shale resulta controversial por muchos aspectos. Una de las principales incertidumbres se refiere a los posibles impactos que tenga sobre el medio ambiente y a la salud humana. Otro aspecto a considerar es determinar si los beneficios, tales como menos emisiones dañinas al medio ambiente o disminución en costos de combustibles que se pueden obtener de la explotación de este hidrocarburo son significativos [8]. Por lo anterior, no ha sido posible la consolidación de la industria del gas Shale, sobre todo en actividades de extracción y aprovechamiento. Por ello se considera necesario conocer los impactos reales que la explotación de este recurso pueda tener en determinado sitio. Aunado a la situación ambiental y energética internacional, los gobiernos están en debate sobre las políticas actuales en cuestiones de promover, modificar o aprobar

leyes *en pro* de comenzar con procesos extractivos de fuentes no convencionales [9]. En algunos países, como México, la explotación de este recurso aún no se ha desarrollado en su totalidad, debido a que hace falta información relacionada con la extracción de gas Shale y sus efectos ambientales; éstos son factores que deben conocerse para poder proponer e implementar las políticas necesarias que impulsen su avance hacia su obtención y empleo.

Mediante un análisis de Inteligencia Tecnológica, se puede determinar qué tan relevante ha sido el gas Shale desde su descubrimiento hasta la actualidad, con lo que se pueden marcar tendencias futuras en su desarrollo, como se ha hecho para otros casos [10-12]. Además, también es posible obtener información sobre las experiencias, relacionadas con este hidrocarburo, en países cuyo desarrollo se encuentra en curso. Para complementar información y despejar dudas en cuanto a impactos ambientales, se han realizado Análisis de Ciclo de Vida (ACV), los cuales han comprobado algunos efectos beneficiosos del empleo del gas Shale, como una menor emisión de gases de efecto invernadero al ambiente. Adicionalmente, también es posible identificar retos en el desarrollo de este gas, principalmente en cuanto a los requerimientos que se necesitan para optimizar su extracción con el menor impacto hacia el medio ambiente. Uno de esos requerimientos es el agua, un recurso indispensable para la vida humana, por lo que es necesario encontrar una solución eficiente que no afecte el derecho humano de acceso al agua.

Es por ello que en el presente trabajo se presenta un análisis de información basado en la técnica de Inteligencia Tecnológica (IT). Este análisis se realizó para determinar el estatus científico y tecnológico del gas Shale en un contexto nacional e internacional. Adicionalmente, con el análisis de IT se buscó información relevante sobre el gas Shale, recabando datos relacionados con los insumos requeridos en el proceso de extracción. Con base en lo anterior, se obtuvo el inventario necesario para efectuar un ACV, el cual permitió determinar los impactos generados en cada etapa del proceso de extracción del gas Shale. Con los resultados obtenidos del ACV, se identificaron aquellos impactos que representan un reto en el desarrollo del gas Shale en México. Esto permite generar propuestas para un desarrollo sustentable y así aprovechar este recurso en el sector energético del país.

2. Antecedentes

2.1 Gas Shale

El gas Shale es un hidrocarburo fósil constituido principalmente por metano (aproximadamente el 95%). Este combustible se genera en formaciones de esquisto, también conocidas como pizarra o lutita (Shale en inglés); un tipo de roca sedimentaria no metamórfica, conformada principalmente por arenas finas. Esta característica ocasiona que tales formaciones no cuenten con una distribución de poros en su estructura, haciendo que tengan muy baja permeabilidad (menor a 0.001 mD); razón por la cual el gas queda atrapado en su interior. La composición del gas Shale tiene cierta variación dependiendo de las características geológicas del sitio donde se encuentre, principalmente la profundidad, siendo un gas de mejor calidad conforme aumenta la profundidad del yacimiento.

Debido a la naturaleza del yacimiento donde se encuentra el gas Shale, este se considera una fuente no convencional de gas natural. La principal diferencia entre una fuente convencional y una no convencional no es la composición o el tipo de gas, sino las propiedades geológicas donde se encuentra. Lo cual influye en el método de extracción empleado para la obtención de este hidrocarburo.

En una reserva convencional, la extracción de gas sigue procesos relativamente sencillos, que, en términos generales, consiste en el perforado hasta alcanzar la reserva. Luego, el gas fluye a la superficie como resultado de las condiciones de presión y con la ayuda de bombeo. Por el contrario, en una reserva no convencional, el gas se encuentra atrapado dentro de la roca aun cuando ésta ha sido perforada desde la superficie. Entonces, es necesario uno o varios pasos adicionales para que el gas quede libre y pueda fluir para ser recuperado [13]. Otro aspecto importante es que las reservas convencionales se encuentran relativamente cercanas a la superficie, mientras que casi todas las reservas no convencionales se encuentran a profundidades alrededor de los 3 km, como se ilustra en la Figura 1.

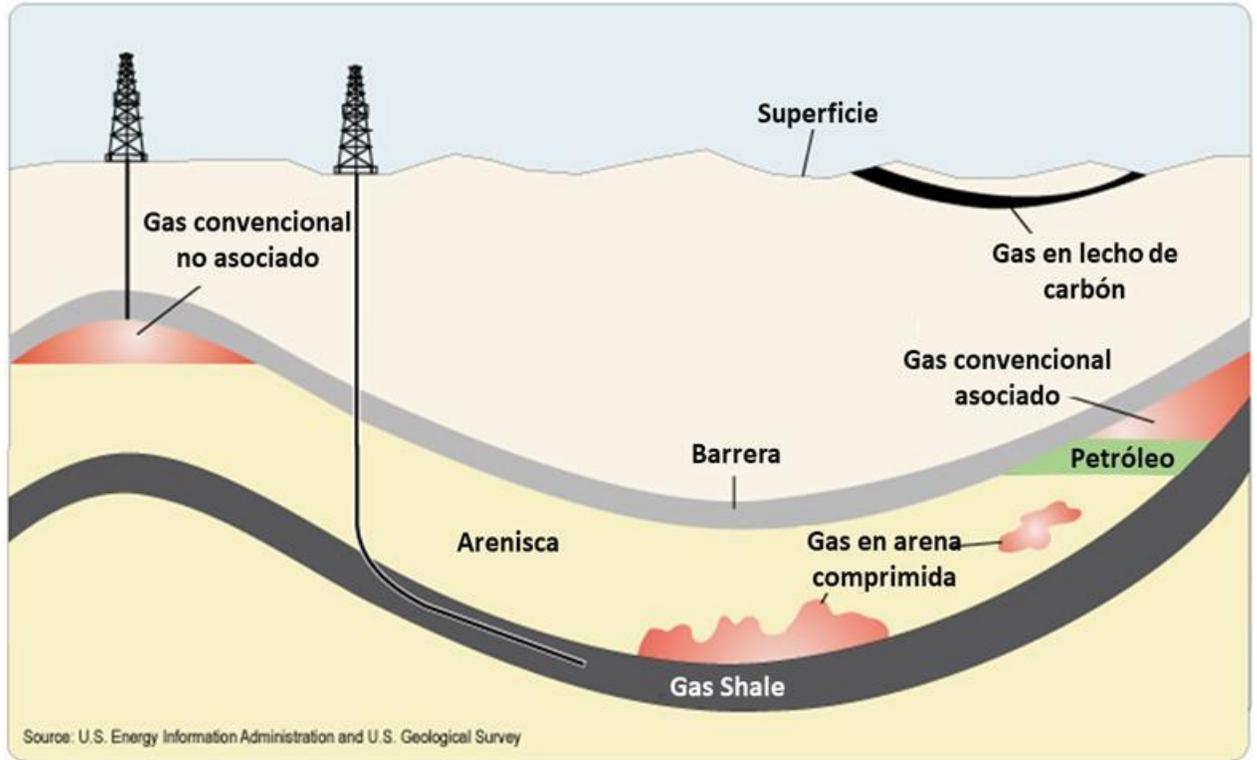


Figura 1. Geología de las reservas convencionales y no convencionales (Modificado de: US Energy & Information Administration [14]).

2.2 Extracción del gas Shale

El proceso de extracción de gas Shale sigue casi los mismos pasos necesarios en la extracción de gas convencional, requiriendo algunos pasos adicionales, como la fractura hidráulica y el perforado en horizontal. En total se siguen seis pasos o etapas, las cuales se describen a continuación [15]:

Etapas 1. Exploración: Es el paso inicial con el que comienza el proceso de obtención del gas Shale. Durante el desarrollo de esta etapa, se hace una perforación en el sitio donde se localizó una posible reserva. La finalidad de esta perforación es, principalmente, comprobar si efectivamente existe gas en el sitio. Posteriormente se procede a determinar las propiedades geológicas del sitio, así como la composición del gas y del volumen estimado que se puede recuperar. Si las características del sitio son favorables, así como una buena cantidad de gas de calidad, se procede a un proceso legislativo para obtener las licencias y permisos necesarios para empezar con el siguiente paso. Esto último puede ser un proceso

de larga duración o relativamente rápido dependiendo de las leyes existentes en el país, además de la postura que se tenga por parte de la comunidad y del gobierno en cuanto a la extracción de fuentes no convencionales de gas natural.

Etapa 2. Preparación del sitio: En esta etapa se procede a construir la estructura que será la base para la extracción del gas. Además de la plataforma, como paso previo, es necesario crear accesos para el transporte de los materiales necesarios y el personal que manejará la base, igualmente maquinaria especializada para la construcción. Para construir la plataforma de extracción es necesario despejar el área de vegetación, recurriendo en algunos casos a la tala de árboles, además de la remoción de plantas que llegasen a localizarse en el lugar. Una vez que el lugar se encuentre despejado, se procede a crear una perforación que conecte al yacimiento con la superficie para que el gas sea bombeado a la superficie una vez que el proceso comience. Durante este paso también se construye una barrera especial alrededor de la tubería principal, construida con metal reforzado y concreto, con el fin de evitar fugas tanto de la mezcla de estimulación como de gas metano hacia los alrededores, previniendo la posible contaminación de recursos hídricos.

Etapa 3. Perforado en el yacimiento: En este proceso se procede a perforar directamente en el yacimiento donde se encuentra el gas Shale. En la mayoría de los casos, el perforado se realiza de manera horizontal, ya que el yacimiento por lo general se extiende por kilómetros, teniendo un grosor relativamente pequeño (~30 m). Para este tipo de perforación, se emplea un taladro especial que, llegando al yacimiento, realiza un giro de 90°, continuando de manera horizontal. Esta perforación tiene como finalidad que el yacimiento cuente con canales de conducción para el agente estimulante y seguir con la siguiente etapa del proceso.

Etapa 4. Estimulación: El gas dentro del yacimiento no se encuentra disponible para su extracción debido a las características del mismo, por lo que es necesario estimular al yacimiento para que el gas se libere. Esta estimulación es conocida como fractura hidráulica o fracking. Se trata de un proceso de ingeniería geomecánica el cual consiste en inyectar una mezcla de agua, compuestos químicos y arena a alta presión para crear fisuras en la roca, haciendo que el gas quede libre para fluir al exterior [16]. La fractura hidráulica generalmente se lleva a cabo en 4 fases, razón por la cual es el proceso que mayor cantidad

de agua requiere, ya que en cada fase se inyecta cierta cantidad de agua con otros aditivos. En la primera fase del proceso, se inyecta una mezcla de ácido diluido, con lo cual se remueven minerales que puedan obstruir el paso del fluido de fractura. Seguido a esto se inyecta agua con otros compuestos. Como tercer fase, se procede a inyectar arena en conjunto con agua para que ésta quede atrapada dentro de las fisuras creadas. Por último, se vuelve a inyectar agua limpia para eliminar el exceso de arena en el yacimiento de gas Shale [17].

En general, en esta etapa es necesario el uso de varios compuestos químicos para facilitar el procedimiento. La principal función de estos es evitar la corrosión de la tubería, mantener constante la viscosidad del fluido, evitar reacciones no deseadas con los minerales de los alrededores, además de eliminar microorganismos que se encuentren presentes en el medio. Usualmente, la cantidad de compuestos químicos y arena varían dependiendo de las características geológicas del sitio donde se encuentra el yacimiento; no obstante, se tiene un estimado de que el porcentaje total de la suma de los compuestos químicos resulta ser menor a 1% de la mezcla inyectada, mientras que la arena contribuye con un 3-5% y el agua empleada constituye alrededor de 94-96% [13, 18]. La selección y el tipo de compuestos químicos a utilizar, así como el tipo de arena empleados en el fluido de fractura varía en función del organismo encargado de la operación. También se debe tener en consideración las propiedades del sitio de extracción, siendo diferente para cada lugar. En la Tabla 1 se muestran el tipo y algunos ejemplos de compuestos químicos, así como su propósito para el proceso de estimulación [17, 19].

Tabla 1. Compuestos químicos empleados en la fractura hidráulica [17-19].

Tipo de Compuesto	Propósito	Ejemplos
Ácido	Disolver minerales e iniciar fisuras en la roca	Ácido clorhídrico
Inhibidor de corrosión	Proteger la barrera de la corrosión	Isopropanol, metanol, ácido fórmico, acetaldehído
Biocida	Eliminar bacterias	Glutaraldehído, cloruro de amonio
Fluido transportador	Crear fisuras y medio de transporte para la arena	Agua
Rompedor	Retrasa la descomposición de geles cuando se requiera	Persulfato de amonio, cloruro de sodio, peróxido de magnesio, cloruro de calcio
Estabilizador de arena	Permitir la deposición de arena en las fisuras	Cloruro de sodio
Enlazador	Mantiene la viscosidad aun con aumento de temperatura	Metaborato de potasio, tetraborato de sodio, ácido bórico, etilenglicol
Reductores de fricción	Reduce la fricción en tuberías	Poliacrilamida, metanol, etilenglicol
Gel	Espesa el agua para suspender la arena	Destilados de petróleo, metanol, mezcla de polisacáridos
Control de óxidos	Previene la precipitación de óxidos metálicos	Ácido acético
Antiemulsionante	Separar mezclas de agua y aceites	Isopropanol, etilenglicol
Ajustador de pH	Mantener la eficacia de otros compuestos	Hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, ácido acético, carbonato de sodio
Antisarro	Previene la formación de sarro en tuberías	Ácido fosfórico, acrilato de sodio, policarboxilato de sodio
Surfactante	Reduce la tensión superficial y ayuda en la recuperación de fluidos	Etanol, naftaleno, alcohol isopropílico

Etapa 5. Operación y producción: Al quedar el gas libre en el sitio, éste se extrae mediante bombeo desde la plataforma; es un método similar a los empleados en la extracción de gas convencional. Una vez que el pozo se encuentra en operación, éste puede tener una productividad que llega a durar de 10 a 30 años de abastecimiento de gas natural. Si en algún momento durante este periodo la productividad disminuye, se recurre a analizar si el sitio es candidato para volverlo a estimular, con lo cual se asegura su productividad por un periodo más prolongado hasta que la reserva alcance el agotamiento de su recurso [20].

Etapa 6. Fin de la producción y clausura: Una vez que la reserva de gas natural llega a su fin o la productividad ya no es rentable económicamente, el pozo es considerado no productivo y las operaciones de extracción se detienen. Es en este punto cuando el sitio comienza por un proceso de limpieza y restauración. La finalidad es recuperar, en la medida de lo posible, el estado original del sitio. Para evitar posibles fugas por gas remanente en el yacimiento, además de evitar contaminación por posibles residuos, el pozo se rellena con cemento creando un sello en el lugar. Después del sellado, el pozo pasa por un periodo de abandono de aproximadamente 2 años, la finalidad de esto es inspeccionar que no exista contaminación que pueda afectar el sitio en el futuro. Posteriormente comienza el proceso de reintroducción de la vegetación que fue removida para la creación de la plataforma. Existen algunos pozos, como en Marcellus, Pensilvania, en donde una vez comenzado el proceso de clausura, se inició un proceso de restauración (Figura 2), observándose que el sitio comienza a retomar su estado inicial [21].



Figura 2. Restauración de un sitio de extracción [21].

2.3 Potencial del gas Shale

El gas Shale, siendo gas natural, representa una buena fuente de combustión para la generación de energía. Es una fuente de combustión más limpia en comparación a otras fuentes, como el carbón, ya que se produce entre 30 y 50% menor cantidad de CO₂ y cantidades casi nulas de material particulado y SO₂. Por lo tanto, es una opción viable para reemplazar otras fuentes de combustión con un efecto más dañino al ambiente [22]. Es por ello que Estados Unidos, siendo consciente de sus reservas de gas Shale, comenzó la extracción y aprovechamiento de este recurso en su territorio, reemplazando al carbón para la generación de energía. Esto reforzó la seguridad energética de Estados Unidos, ya que fue el primero en extraer gas Shale a gran escala comercial, marcando estándares, tendencias y mercados energéticos para otros países con reservas de gas Shale [23]. Dada su experiencia en cuanto a extracción de fuentes no convencionales, Estados Unidos es considerado el país con la tecnología más avanzada para la explotación del gas Shale [23]. Con estos avances, la nación trata de promover el desarrollo sustentable de este recurso para que existan mejores prácticas de extracción con la mínima interferencia en el medio ambiente. Otros países con reservas no convencionales carecen de la tecnología necesaria para obtener este tipo de recursos, por lo que estudiar y analizar la tecnología de Estados Unidos para adaptarla a diferentes países es un hecho que ocurre actualmente, como es el caso de China [24]. El reemplazo del uso de carbón por gas tuvo efectos positivos en Estados Unidos, ya que sus emisiones contaminantes disminuyeron. Así mismo, para el año 2013, del total de gas natural empleado, el 35% correspondía a gas Shale, teniéndose estimaciones de que esta cantidad aumentará en años posteriores [24].

Otro país con recursos no convencionales es Canadá, y siguiendo los pasos de Estados Unidos, también comenzó su extracción, aunque en una escala más pequeña. Para 2014, la aportación de gas no convencional representó aproximadamente el 4% del total del gas natural en el país, teniendo expectativas de aumentar esta cantidad al 80% para el año 2035. El aumento y variación en los precios del petróleo fue el impulso necesario para que Canadá aprovechara el gas Shale de su territorio, además de visualizar la posibilidad de exportar parte del gas extraído para beneficio de su economía [15].

China posee la reserva de gas Shale más grande en el mundo identificada hasta el momento. Según la Administración de Información Energética de Estados Unidos, cuenta con aproximadamente 31×10^{12} m³ de gas natural, por lo que no podía dejar este recurso sin emplear [25]. Es por lo anterior que China se convirtió en el tercer país en lograr extraer y utilizar el gas Shale a nivel comercial; comenzó en pequeña escala y alcanzó 60×10^8 m³ de gas recuperado para finales del 2015 [26]. El principal interés de China por el gas Shale fue reemplazar el uso del carbón, principal recurso para la producción de energía, ya que su uso excesivo ocasiona grandes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. El beneficio de usar gas es que esta fuente produce la mitad de CO₂ y menor cantidad de otras emisiones en la generación de 1 kWh de electricidad, además de poseer una mayor eficiencia térmica para su combustión [27].

En general, el desarrollo del gas Shale representa un beneficio en la economía de comunidades cercanas a yacimientos de este recurso, ya que se generan nuevos empleos para montar y operar una plataforma de extracción. Este proceso impulsa a la economía local debido a nuevas oportunidades como la generación de cadenas de suministros, además de desarrollar tópicos relacionados en el campo de recursos naturales, impulsar el sector energético y estimular a la comunidad científica a proponer mejores procesos con menor impacto ambiental [28].

2.4 Retos del gas Shale

A pesar de que existen varias reservas de gas Shale distribuidas en el mundo, solo tres países hasta el momento producen este recurso a nivel comercial. Para el resto de los países con reservas no convencionales aún existe cierta oposición en su aprovechamiento. Esto probablemente se deba a la falta de estudios a nivel regional, y de información sobre posibles efectos adversos en el medio ambiente; ocasionados por el tipo de procesos que se requieren para extraer este hidrocarburo. Otro aspecto son las cuestiones políticas, ya que, al tratarse de procesos no convencionales, las leyes y normas existentes carecen de procedimientos a seguir. También es necesario establecer los derechos sobre acceso a la información por parte del público en áreas cercanas, con lo cual se pone en juego la aceptación de la comunidad. La carencia de normas adecuadas en procedimientos de

extracción no convencionales se debe a que no en todos los casos se cuenta con la tecnología apropiada, por lo que se deben reevaluar las normas con la tecnología actualmente en desarrollo para determinado país [29-32]. El desarrollo del gas Shale ha generado varias controversias entre la comunidad científica, política y urbana. Los principales temas de discusión son en relación a los efectos derivados de los procesos de obtención de fuentes no convencionales, especialmente en la calidad del agua y aire. Otros efectos importantes se relacionan con el agotamiento de los recursos hídricos empleados en el proceso, posibles fuentes de contaminación hacia la biota y los ecosistemas, efectos en la salud humana para comunidades cercanas a sitios de extracción, entre otros [33-36].

El empleo de la fractura hidráulica para la extracción de gas Shale es el tema central de discusión en varios aspectos [37-39]. Esta discusión se debe principalmente a la preocupación por la posible contaminación de fuentes de agua con metano o fluidos de la fractura, es decir, algunos de los compuestos químicos empleados durante la estimulación (ver Tabla 1). Por tal motivo, las agencias gubernamentales financian estudios con el fin de obtener datos relevantes en cuanto a concentraciones y mecanismos de transporte de algunos contaminantes, previo a la extracción de gas Shale [40]. Existen redes de monitoreo en sitios donde el gas es extraído, con lo que se puede estudiar los impactos que se pudieran tener durante el proceso y preservar los recursos hídricos [41]. Algunos resultados del monitoreo del agua empleada en la fractura hidráulica muestran que, del volumen total, alrededor del 25% regresa como agua residual; en su composición se ha identificado la presencia de fluido de fractura, sales disueltas y en algunos casos, productos secundarios formados durante el proceso [42, 43]. Además, la cantidad de agua requerida en la obtención de este tipo de recursos es otro punto a tratar. Para el proceso de fractura hidráulica se requieren grandes volúmenes, variando entre 8000 y 100000 m³ de agua, dependiendo el sitio y sus características geológicas [44-47]. Esta situación resulta complicada ya que en ciertas regiones con reservas de gas Shale el agua es escasa. Por lo tanto, se presenta un dilema puesto que se debe evaluar si el empleo del agua será para consumo humano, actividades agrícolas o para la obtención de recursos fósiles. Para la situación descrita con anterioridad, existen algunas alternativas y avances tecnológicos que pueden disminuir el consumo de agua destinado a este tipo de actividades. Una de ellas es darle un tratamiento adecuado al agua residual, como ósmosis inversa o algunos procesos

de biorremediación. De esta manera también se pueden recuperar algunos minerales contenidos en el efluente [48]. Con un buen tratamiento de las aguas residuales, ésta puede utilizarse nuevamente en otros procesos de fractura hidráulica o volver a fuentes naturales de agua. La cantidad de agua recuperada varía entre el 40 y el 60%, empleando métodos como destilación en columna y la compresión mecánica de vapor, donde el costo depende de la energía y el tipo de maquinaria empleada [49-51]. En la Figura 3 se muestran las estrategias que se siguen en el tratamiento de agua residual producto del proceso de obtención del Shale [52].

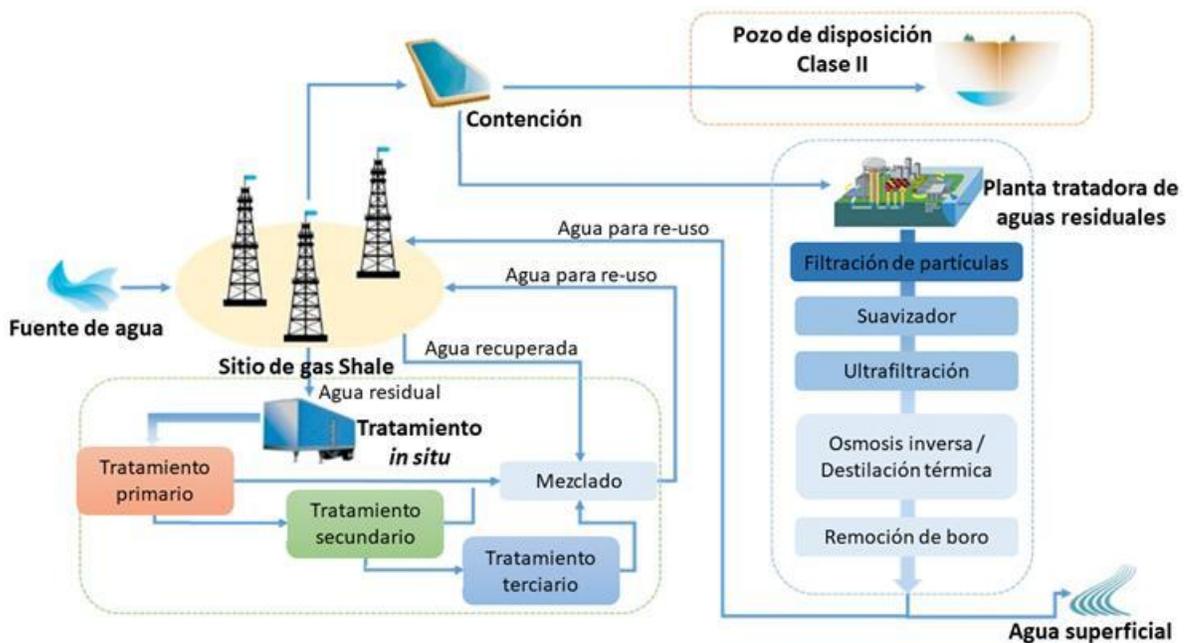


Figura 3. Estrategias de remediación de agua residual obtenida de sitios de gas Shale (Modificado de [52]).

Por otro lado, se ha detectado actividad sísmica de escala pequeña (<2.5 grados en la escala de Richter) durante las operaciones de fractura hidráulica. No obstante, se ha determinado que éstas no representan una amenaza al sitio o a comunidades cercanas a un sitio de extracción. En efecto, los sismos generados son de escalas pequeñas, además de tener una corta duración, por lo que no son percibidos por los humanos y no ocasionan daños estructurales. Se ha reportado que el sismo de mayor intensidad, relacionado con la extracción de gas Shale, fue de 2.3 grados Richter en el Reino Unido [13].

Otro aspecto importante a destacar es el uso de suelo y el cambio en el uso del mismo. Se ha reportado que la construcción de una plataforma para la extracción de gas Shale resulta tres veces más dañina que el espacio destinado para una turbina eólica; sin embargo, esto resulta en impactos similares si se considera que un parque eólico está constituido por más de una turbina y que además una turbina requiere de aproximadamente 50 ha, mientras que un pozo de gas 2 ha [53]. Aunado a esto, la cantidad de energía obtenida mediante la explotación de un pozo de gas Shale es de alrededor de 50000 GJ/año mientras que de una turbina se generan aproximadamente 23000 GJ/año [53]. En dicho estudio se encontró que los pozos de gas tienen mayor impacto en suelo de uso agrícola, mientras que los parques eólicos impactan más en áreas naturalmente destinadas a pastizales y pastoreo. Así, se concluyó que tanto la explotación de gas no convencional como la energía eólica presentan impactos ambientales de similar magnitud, específicamente los relacionados con el uso de suelo [53].

Al respecto de la cuantificación de impactos ambientales, se ha reportado en Estados Unidos que las emisiones de gases efecto invernadero del gas Shale, dentro de un análisis de ciclo de vida, son un 6% más bajas a las generadas por el gas convencional, 23% menos que la gasolina y 33% menos que el carbón. Así, se ha concluido que esta fuente no representa mayores impactos en comparación con otros combustibles fósiles al medio ambiente en cuestión de emisiones a la atmósfera [54].

Se han realizado muchos avances en relación a la obtención del gas Shale tanto en el ámbito tecnológico como científico. Este avance ha sido posible debido a la sinergia de varias disciplinas en respuesta a factores económicos y ambientales, haciendo que las inversiones en este tópico sean justificables. Aún existen aspectos para mejorar, como la adaptación de métodos de extracción, las técnicas de construcción de sitios, así como el modelado y simulación para determinar diseños extractivos óptimos y seguros [55].

2.5 Gas Shale en México

Según la Administración de Energía e Información de los Estados Unidos, México se localiza en la sexta posición en cuanto a reservas de gas Shale en el mundo, contando con

aproximadamente 16×10^{12} m³ de gas técnicamente recuperable. Los principales yacimientos se localizan en el norte del país, concretamente en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Chihuahua, en las cuencas Sabinas, Burro-Picachos y Burgos. Las dos primeras cuencas son parte de la misma encontrada en el territorio estadounidense, denominada Eagle Ford [56]. Existen algunos otros yacimientos localizados en el centro y sur del país, cerca del Golfo de México, en los estados de Tamaulipas y Veracruz (Figura 4).



Figura 4. Localización de recursos no convencionales en México.

PEMEX, al ser el único operador de los hidrocarburos en México, comenzó con la exploración de gas Shale en 2011. Se construyeron 6 pozos exploratorios, encontrando gas seco en 2013 en el estado de Coahuila, cerca de la frontera con Estados Unidos, principalmente en el área de Sabinas y Burgos. Al compartir ciertas similitudes con la cuenca de Estados Unidos, se tienen estimaciones de que en caso de que se llegue a explotar el gas Shale encontrado en México, se puede obtener una producción similar a la reportada en la cuenca de Eagle Ford [57, 58].

La experiencia de Estados Unidos en la obtención de gas Shale provee ciertas recomendaciones para México, con lo que se pueden desarrollar mejores prácticas de extracción que minimicen el impacto en el medio ambiente. Con lo anterior, se pueden tomar las consideraciones necesarias para crear las políticas pertinentes respecto al aprovechamiento de fuentes no convencionales.

Las circunstancias para el desarrollo del gas Shale en México caen en lo favorable ya que se ha vuelto un gran importador de gas natural desde el año 2002. Esto se debe, entre otros factores, a la demanda energética del sector doméstico, que trae como consecuencia que el precio del gas en México sea mayor que el precio en Estados Unidos [59]. Además, en Estado Unidos se cuenta con la experiencia de investigadores que hacen posible el aprovechamiento del gas Shale, así como el aporte económico gubernamental para el desarrollo de actividades científicas en este ramo. La óptima explotación del gas Shale en México representa todo un reto debido a la falta de infraestructura necesaria y de planes a largo plazo para la producción del mismo. Otros factores que afectan el aprovechamiento del gas Shale en México es la zona geográfica en las que se localizan las reservas de gas, como las propiedades físicas, profundidad, composición del gas, además de la demanda que tenga el gas natural en el futuro.

Los planes de explotación del gas Shale en México son una realidad que se encuentra en desarrollo. Actualmente se trabaja en legislaciones ambientales con la finalidad de establecer reglas de operación en los diferentes sitios con potencial productivo. En este sentido, es conveniente elaborar estudios de impacto ambiental que permitan aportar información que ayude a la toma de decisiones y a la complementación de la legislación en proceso.

2.6 Análisis de Ciclo de Vida

Ante las controversias y conflictos relacionados con el impacto ambiental generado por la cadena de producción del gas Shale, es de suma importancia identificar las causas de estos impactos para verificar que, en efecto, el obtener gas Shale resulta perjudicial para el medio ambiente como se tiene catalogado. Hay que resaltar que en la mayoría de las fuentes de producción de energía existen algunos retos a vencer, por lo que una vez identificados, la creación de estrategias para minimizar posibles efectos adversos es un paso fundamental en cualquier tipo de desarrollo energético, para que este tenga un diseño sustentable en cada proceso empleado [60, 61].

En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología de utilidad para el efecto de identificar impactos al ambiente. Se ha aplicado ampliamente en diversos estudios con el fin de optimizar procesos de una manera sustentable [62, 63].

El ACV es un método que permite cuantificar y caracterizar los impactos potenciales sobre el medio ambiente, asociados con un producto o un proceso durante su ciclo de vida. Este método ha sido estandarizado en las normas ISO 14040 [64], correspondientes a la familia de normas y estándares encargadas de mantener una administración sobre el medio ambiente, guiando a empresas para el cuidado y conservación del mismo. El marco general de un ACV se puede resumir como se presenta en la Figura 5 [65].

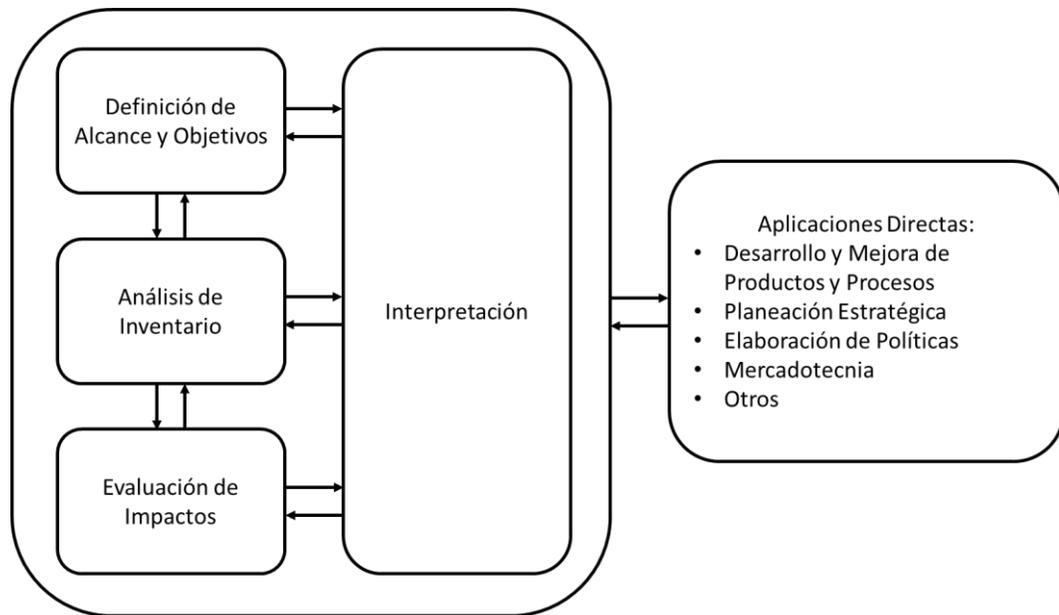


Figura 5. Marco general del ACV.

El objetivo de realizar un ACV va a depender de la aplicación que se le dé; sin embargo en general el principal objetivo de usar un AVC está orientado a reducir los impactos ambientales de productos y/o servicios a través de guiar la toma de decisiones hacia soluciones más sustentables. Un estudio clásico de ACV involucra cuatro fases básicas con las cuales se pueden identificar estrategias óptimas para un desarrollo sustentable [66]. Estas cuatro fases se describen a continuación:

Objetivo y alcance del estudio: En esta primera fase se establecen las configuraciones y características básicas de un ACV, incluyendo el objetivo del estudio, sus límites y la unidad funcional que se empleará. El objetivo principal dentro de un ACV es cuantificar los impactos ambientales de determinado producto; mientras que en otros casos es empleado para comparar el desempeño entre productos. Los límites del sistema son considerados teniendo en cuenta los procesos que contribuyen a los impactos ambientales dentro del estudio para determinado producto. La unidad funcional es un elemento clave para un ACV, ya que es una medida de la función del producto a estudiar, además de proveer una referencia para las entradas y salidas relacionadas a los procesos bajo estudio.

Análisis de inventario: Consiste en la recopilación y procesamiento de los datos asociados al ciclo de vida del producto o sistema bajo estudio. Es una fase fundamental para cualquier ACV a realizar. Para esta fase es necesario describir las entradas y salidas tanto de masa como de energía en cada proceso involucrado para la obtención de determinado producto. Es de utilidad contar con un diagrama de flujo, empleando bloques para representar un proceso y sus correspondientes entradas y salidas. La información correspondiente debe presentarse con base en la unidad funcional previamente seleccionada.

Evaluación de impactos: Esta fase del ACV es la más significativa; es el proceso de interpretar y transformar los datos generados en el Análisis de inventario a indicadores de impacto ambiental, para cuantificar los efectos de los procesos involucrados. A partir de dichos indicadores es posible determinar la contribución de una categoría de impacto al ambiente. De acuerdo con la ISO 14044 [67, 68] existe una serie de pasos para determinar los indicadores; algunos pasos son obligatorios y otros son opcionales. Los pasos obligatorios son la Definición y clasificación de las categorías de impacto y la Caracterización. Para definir las categorías de impacto existen varias metodologías, las cuales consideran tres áreas principales de protección: calidad del ecosistema, salud humana y recursos naturales.

Existen dos tipos de categorías de impacto ambiental: impacto de punto medio e impacto de punto final. La categoría de impacto de punto medio refleja los impactos directos al medio ambiente, como el cambio climático, agotamiento de ozono, acidificación, eutrofización, entre otros. En el caso de punto final, esta categoría va más allá del punto medio y evalúa

los impactos ambientales finales de las intervenciones en las áreas de protección, como la salud humana, diversidad de ecosistemas y disponibilidad de recursos.

La ventaja de utilizar el enfoque de punto medio es que arroja menos supuestos; mientras que el de punto final tiene como ventaja el proporcionar mediciones más intuitivas, como la pérdida de años de vida en lugar de kg de CO₂ equivalente, teniendo una ponderación más estructurada. La desventaja del primer enfoque es que los resultados obtenidos no suelen ser muy relevantes para la toma de decisiones cuando se habla a largo plazo. Como desventaja del segundo enfoque, es necesario contar con información suficiente para poder obtener resultados fiables; de otra manera estos no estarán bien sustentados, haciendo difícil su comprensión. Es de utilidad emplear ambos enfoques en un estudio, ya que de esta manera utilizando el punto medio se pueden sustentar los resultados de un punto final, lo cual dará validez a lo obtenido por el primer enfoque [69].

Algunos ejemplos de métodos de impacto de punto medio son el *IMPACT World+*, el *Ecological Scarcity* y *CML*. Para el caso de métodos de impacto de punto final existen el *Eco-Indicador 99* y el *ReCiPe Endpoint*, entre los más empleados [68].

Interpretación de resultados: Es la última fase dentro de un ACV, en donde se resume y discuten el inventario y la evaluación de impactos ambientales. De esta manera se establecen las bases para llegar a las conclusiones, recomendaciones y a la toma de decisiones de acuerdo con lo establecido en el objetivo y alcance del estudio.

Dentro de temas relacionados con los impactos ambientales del proceso de obtención del gas Shale, se han realizado varios ACV para conocer el grado de riesgos ambientales de dicho proceso [70-72].

En un estudio de revisión [73] se ha reportado que el principal interés de los ACV encontrados en literatura se enfocan en el potencial de calentamiento global de la explotación de recursos subterráneos (incluyendo el gas Shale) para la producción de energía y se presta poca atención a otros impactos. En ese mismo estudio se determinó que, en general, la operación normal del proceso de aprovechamiento de gas Shale conduce a un gran impacto ambiental debido principalmente al proceso de fractura hidráulica y a la naturaleza no renovable del gas. También se determinó que existe un área de oportunidad

relacionado con la combinación de estudios de evaluación de riesgos y de análisis de ciclo de vida para contribuir en el proceso de toma de decisiones.

Otras de las investigaciones relacionadas con ACV de gas Shale se refieren al modelado de comportamiento de las cadenas de suministros de este hidrocarburo desde la extracción hasta la distribución como energía eléctrica [52, 66]. En estos estudios se analiza información correspondiente a la operación de un pozo ya construido de gas Shale y de la planta generadora de energía, pero no aborda la etapa de construcción y puesta en operación del pozo.

Por otra parte, también se han realizado estudios de ACV donde se analiza la huella de carbono del gas Shale en su ciclo de vida, desde la extracción hasta la generación de energía. Estas investigaciones se han centrado en la comparación del impacto ambiental del gas Shale frente al gas natural convencional [54, 71, 74], y otros hidrocarburos como carbón y petróleo [54]. En uno de dichos estudios se analizan 6 diferentes ACV referentes a la huella de carbono de gas natural y de gas shale [71]; donde se encontró que la huella de carbono de la extracción del gas Shale y gas natural son similares ($11-21 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$ vs $12.4-19.5 \text{ CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$). Se indica también que puesto que la explotación del gas Shale representa menos del 25% de la huella de carbono total, es necesario identificar estrategias para minimizar la huella de carbono en los servicios de transporte, generación de calor y de producción de energía, entre otros.

En [74] se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de la producción de gas Shale de Marcellus y se compara con las emisiones nacionales promedio de gas natural convencional en EE. UU. en 2008. Se calcula que desde la exploración hasta la conclusión de la construcción se obtiene una huella de carbono de $1.8 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$ considerando estimaciones conservadoras de producción de gas. Este valor corresponde con un aumento del 11% en las emisiones de GEI en comparación con el gas natural. Y cuando se incluye la combustión del gas el aumento es de 3% de las emisiones. Se encontró que las emisiones de GEI del ciclo de vida del gas Shale de Marcellus son $63-75 \text{ g de CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$ (con un promedio de $68 \text{ g de CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$), estos valores son comparables a las del gas natural licuado importado. En cuanto a la comparación con el carbón, las emisiones de GEI del gas

Shale son más bajas que el carbón en la producción de electricidad en un 20-50% dependiendo de las eficiencias de la planta y la variabilidad de las emisiones de gas natural.

Por otro lado, existen algunos ACV de Gas Shale muy localizados. Por ejemplo en [75] se presenta un ACV del aprovechamiento de gas Shale en Túnez donde se consideran seis etapas: Preparación del sitio, exploración, desarrollo de plataforma, producción, distribución y clausura del pozo. La unidad funcional empleada fue 1 MJ de energía a partir de gas Shale y el análisis se realizó mediante SimaPro utilizando el método ReCip Endpoint. No se menciona el inventario ni el origen de los datos. Se entiende que se trata de datos estimados. Se concluyó que la etapa de desarrollo de la plataforma es la etapa que más contribuye en el impacto global del aprovechamiento del gas Shale seguida de la exploración.

De manera similar, con el objetivo de estimar los impactos ambientales mediante ACV del aprovechamiento de gas shale en el Reino Unido, se realizó un análisis poniendo especial interés en el uso del agua [76]. El proceso de explotación de gas Shale fue modelado por 8 etapas e implementado en el software GaBi: Exploración, Preparación de accesos, Perforado vertical, Fractura hidráulica, Construcción del pozo, Producción, Construcción de líneas de distribución y transmisión (distribución), y Postproducción (clausura). La unidad funcional considerada fue la entrega de 1 MJ de gas natural al consumidor a baja presión y se empleó Ecoinvent como método de cálculo. Los datos utilizados provienen de reportes disponibles correspondientes a sitios en producción.

También en China se han realizado ACVs para determinar el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) del aprovechamiento de gas Shale [77]. En este caso el proceso se modeló a través de cuatro etapas: Preparación del sitio, Perforación, Fractura y construcción de pozo, y Producción. Aunque no se menciona de manera explícita, se deduce que se utilizó el software GABi, el método de cálculo IPCC y la unidad funcional de 1 MJ de energía obtenida. Los datos de consumo de energía se obtienen de información oficial reportada y los de producción se obtienen de reportes de los operadores en las zonas consideradas. En esa investigación se concluyó que la etapa de perforación es la que más energía consume (especialmente diésel), representando cerca del 80 % del consumo global, de la cual dos tercios corresponden a uso indirecto (asociado a

procesos de producción y transporte de insumos) y un tercio se asocia al consumo por actividades in situ. La Fractura y construcción del pozo representa cerca del 20 % del consumo global de energía, más de la mitad corresponde a consumo indirecto.

Es difícil realizar un ACV completo de gas Shale debido a que su cadena de producción es muy amplia; además, no siempre se puede contar con información sobre todo el proceso, por lo que los resultados no siempre llegan a ser precisos. Algunos análisis realizados se enfocan principalmente en el uso de la energía requerida, la cual se traduce en la combustión de alguna fuente fósil como petróleo o carbón, llevando a realizar en conjunto un análisis de emisiones de gases efecto invernadero. Se ha reportado que el perforado, tanto del pozo hacia la reserva y en la reserva, es la actividad que requiere una mayor cantidad de energía; ésta es proporcionada por la combustión de diésel, lo que ocasiona emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente [77]. La mayoría de los estudios encontrados en literatura presentan resultados globales del impacto al ambiente de las etapas de explotación del gas Shale, pero no indican la relación de los impactos asociados a los insumos requeridos en cada etapa del proceso, excepto del agua [76]. Es importante identificar qué insumos son los que contribuyen en mayor medida con e impacto al ambiente con lo que pueden proponerse alternativas para reducirlo.

3. Justificación

Desde el año 2002, México ha atravesado etapas difíciles en cuanto a demanda energética, por lo que se vio obligado a importar mayores volúmenes de gas, proveniente de Estados Unidos [78]. La obtención y empleo de gas Shale a nivel nacional representa varios beneficios, como la promoción de inversiones que generen altos ingresos, la generación de nuevos empleos directos e indirectos, el fortalecimiento de la industria energética al desarrollarse cadenas de valor hacia la petroquímica, y la reducción de importación de gas natural, teniendo seguridad energética en el país. En este campo existen 2 alternativas con respecto al gas natural en México: continuar con la dependencia del gas de Estados Unidos para cubrir la demanda o crear condiciones necesarias para explotar los yacimientos de gas Shale y asegurar la autosuficiencia [59].

Se ha evaluado la reforma energética de México, con lo que se ha establecido que existe la oportunidad de extraer el gas Shale del territorio por parte de inversionistas extranjeros, los cuales cuentan con experiencia en el campo del gas Shale. Lo anterior puede dar un impulso a la economía mexicana, reduciendo los precios del gas natural, además de contar con abastecimiento suficiente en los sectores doméstico e industrial. También es importante conocer las tendencias del gas Shale en la comunidad científica y tecnológica, con lo cual se pueden establecer puntos clave para su desarrollo.

En este sentido, es de gran importancia conocer las implicaciones relevantes en el proceso de obtención del gas Shale, como requerimientos, posibles riesgos ambientales y propuestas para que se lleve a cabo bajo un desarrollo sustentable.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Realizar un estudio de impacto ambiental de la extracción de gas Shale en México, basado en el Análisis de Ciclo de Vida, para identificar áreas de oportunidad, además de proponer una estrategia de aprovechamiento sustentable de este recurso.

4.2 Objetivos particulares

Analizar información sobre requerimiento de insumos en las diferentes etapas del proceso de extracción de gas Shale mediante un análisis de Inteligencia Tecnológica para conformar el inventario empleado en un Análisis de Ciclo de Vida.

Proponer estrategias, basadas en los resultados del Análisis de Ciclo de Vida, para la extracción del gas Shale en México bajo una perspectiva de desarrollo sustentable.

5. Metodología

5.1 Enfoque basado en la Inteligencia Tecnológica

El método de Inteligencia Tecnológica es empleado para identificar oportunidades de innovación con las cuales se pueden diseñar estrategias de desarrollo. Se basa en el análisis de información de publicaciones científicas, patentes, libros y otros tipos de documentos por parte de expertos e investigadores en determinado tema. De este análisis se pueden establecer tecnologías actuales y futuras, además de identificar competidores y colaboradores potenciales. Este método incorpora diferentes puntos de vista multidisciplinarios, herramientas informáticas y enfoques emergentes tales como la teoría inventiva de resolución de problemas. La Inteligencia Tecnológica ha sido aplicada en diferentes campos y situaciones, desde problemas económicos hasta tecnológicos.

Es necesario un análisis de la información para identificar tendencias pasadas y actuales relacionadas con actividad científica y tecnológica sobre el gas Shale, con lo que también se pueden determinar retos y barreras para su desarrollo, teniendo así planes para asegurar el futuro del tema a tratar [79].

5.1.1 Fuentes de información científica

Para este estudio, se escogieron dos bases de datos para analizar las tendencias en el campo científico sobre el gas Shale y obtener información requerida para análisis posteriores. Las bases de datos a analizar son: Scopus y Web of Science. El término de búsqueda empleado fue “shale gas”, debido a que se esperaba identificar la actividad global referente a este hidrocarburo.

Se seleccionó a Scopus debido a que posee una gran cobertura para la obtención de documentos científicos, ya que tiene 1.4 mil millones de referencias citadas. Esta base cuenta con más de 22800 revistas considerando varias de acceso libre, además de tener más de 5000 editores y contar con artículos publicados en memorias de congresos. Esta base de datos tiene como limitante la cobertura temporal, ya que el documento más antiguo referente al gas Shale data de 1956.

En el caso de Web of Science, ésta cuenta con 150 millones de registros, además de poseer más de 20000 revistas, incluyendo algunas de acceso libre. Estos números son menores a los encontrados en Scopus, siendo la limitante de emplear esta base de datos, aunque el año más antiguo en que se reportan documentos relacionados al gas Shale data de 1951, teniendo más antigüedad.

5.1.2 Fuentes de información tecnológica

Para este apartado se emplearon cuatro motores de búsqueda: Google Patent Search, Scopus, LatiPat y SIGA. Con estos, se tiene en mente analizar tendencias en el campo tecnológico, refiriéndose a los avances que se han registrado relacionados a procesos de obtención y desarrollo del gas Shale.

Google Patent Search puede acceder a 17 oficinas de patentes alrededor del mundo, lo que lo convierte en un motor de búsqueda amplio del cual se puede obtener una cantidad deseable de resultados. Un inconveniente de este motor de búsqueda es que en algunas ocasiones el número total de resultados puede variar, haciendo que el total sea un número variable según la fecha en que se realizó la búsqueda.

En cuanto a Scopus, éste ofrece la opción de ver patentes relacionadas al gas Shale cuando se hace una búsqueda de documentos científicos. El inconveniente es que el número de coincidencias es menor al de Google Patent Search, esto debido a que Scopus es una plataforma enfocada principalmente a documentos científicos.

LatiPat y SIGA se escogieron para la búsqueda de patentes mexicanas y de origen Latinoamericano, por lo que la mayoría se encuentra en idioma español. LatiPat es una base de datos con información para Iberoamérica (América Latina, España y Portugal), mientras que SIGA es la Gaceta de Sistema de Información de la Propiedad Industrial y pertenece al Instituto Mexicano para la Protección Industrial. Se recurrió a estas bases para tener un análisis más cercano en cuanto a nivel nacional en el desarrollo del gas Shale.

5.2 Evaluación de impacto ambiental

Esta etapa de la tesis se realizó siguiendo la metodología del ACV, para lo cual en primer lugar se definió el Objetivo y alcance de análisis, posteriormente se generó el Inventario para finalmente pasar a la Evaluación de impactos y la Interpretación de los resultados derivados de la evaluación de impactos.

5.2.1 Supuestos de modelado y límites del sistema

Para este estudio, se consideraron las diferentes etapas dentro del proceso de obtención del gas Shale. El enfoque de este análisis es identificar los impactos ambientales de cada una de estas etapas, por lo que actividades laterales a este proceso, como el empleo del gas y su transporte, así como la mano de obra, no serán tratadas en el estudio.

El esquema funcional empleado para el ACV se muestra en la Figura 6, donde se consideran los seis pasos del proceso de extracción que se mencionan en el apartado 2.2.



Figura 6. Esquema funcional del proceso de extracción del gas Shale.

5.2.2 Inventario del ACV

El objetivo en este paso es identificar insumos empleados en cada etapa del proceso de obtención del gas Shale, así como el obtener datos relacionados para cuantificar estos insumos. Este inventario es necesario para realizar el ACV y obtener resultados útiles basados en lo que se reporta, para que el análisis sea lo más apegado posible a la realidad.

Algunas bases de datos pueden incluir algunos insumos empleados, no así la cantidad que es requerida en el proceso. Con el Análisis de Inteligencia Tecnológica, se seleccionará literatura para obtener datos más precisos sobre los insumos requeridos, teniendo una guía base para la conformación del inventario [80].

5.2.3 Evaluación de impactos

La evaluación se realizó empleando el software SimaPro, el cual utiliza una metodología de cálculo establecida en las normas ISO 14040; además es uno de los softwares más empleados actualmente para estudios de este tipo. Dentro de SimaPro, se consideraron dos métodos de cálculo: *ReCiPe Endpoint* y *Ecological Scarcity*. El primero de ellos provee una amplia gama de impactos obtenidos hasta un punto final, es decir, cuenta los daños que se pueden obtener a largo plazo en el análisis de un proceso; este método incluye 17 indicadores de impacto: Cambio climático–Salud humana, Agotamiento de ozono, Toxicidad humana, Oxidantes fotoquímicos, Formación de material particulado, Radiación, Cambio climático–Ecosistemas, Acidificación terrestre, Eutrofización, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad hídrica, Ecotoxicidad marina, Ocupación agrícola, Ocupación urbana, Cambio de uso de suelo, Agotamiento de metales y Agotamiento de recursos fósiles. Por su parte, el método *Ecological Scarcity* considera impactos de punto medio a través de 7 indicadores: Emisiones–Aire, Emisiones–Agua superficial, Emisiones–Agua subterránea, Emisiones–Suelo, Recursos energéticos, Recursos naturales y Desechos depositados [68].

De revisión bibliográfica y experimentación previa, se pueden establecer algunos aspectos a estudiar dentro de un ACV, cada uno evaluando ciertos aspectos. Algunos indicadores relevantes en el estudio actual son los daños ocasionados al medio ambiente, tales como contaminación de agua, suelo y aire, además de contabilizar emisiones de carbono al ambiente.

5.3 Creación de propuestas de desarrollo

Con base en los resultados que se obtengan en el ACV, se plantean algunas propuestas de desarrollo sustentable relacionadas con el proceso de obtención del gas Shale. Con esto se buscará que los impactos generados durante el proceso para obtener este hidrocarburo sean mínimos o nulos para el medio ambiente.

6. Resultados y Discusión

6.1 Análisis de Inteligencia Tecnológica

Se realizó un análisis basado en la metodología de Inteligencia Tecnológica, la cual consiste en una exploración del historial de la actividad científica y tecnológica relacionados con el gas Shale, para identificar momentos clave, estatus y tendencias en su evolución. Adicionalmente, del análisis de la información se recabará parte de los datos necesarios para el estudio de impacto ambiental por ACV. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada tipo de información.

6.1.1 Información Científica

En la Figura 7 se muestra el registro de publicaciones encontradas por Scopus desde 1956 hasta 2017, que fue un total de 8361 documentos publicados. Se aprecia que antes del año 2010 el gas Shale fue un tópico poco atendido dentro de la comunidad científica, reportándose sólo 382 documentos publicados, un promedio de 7 por año. En la Figura 8 se tiene una mejor apreciación de la actividad científica entre los años 1956 y 2000, donde 1987 fue el año que presentó más documentos publicados, 11 en total. A partir del año 2010 se notó una tendencia creciente en las publicaciones sobre gas Shale, teniendo un total de 7979 documentos hasta finales del 2017, un promedio de 997 por año. Este incremento pudo deberse a la preocupación por el agotamiento del petróleo, lo cual dirigió la atención a la búsqueda de fuentes alternativas al mismo. Después de la revolución del Shale (alrededor del 2006), muchos países buscaron replicar los resultados obtenidos en Estados Unidos, lo cual ha requerido de investigación científica y desarrollo tecnológico, lo que explica el aumento en las publicaciones.

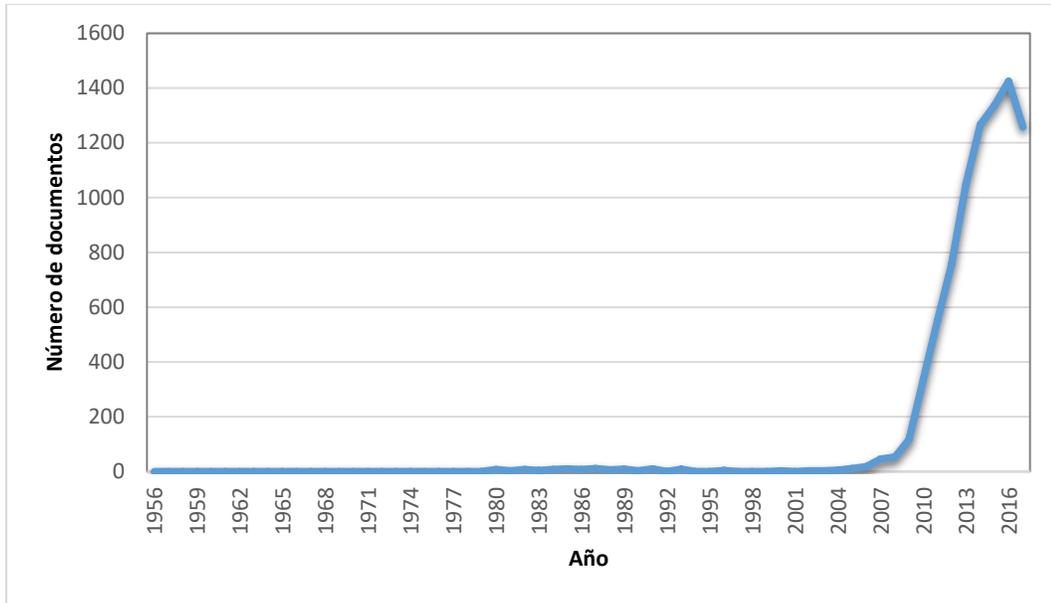


Figura 7. Publicaciones relacionadas con gas Shale de 1956 a 2017.

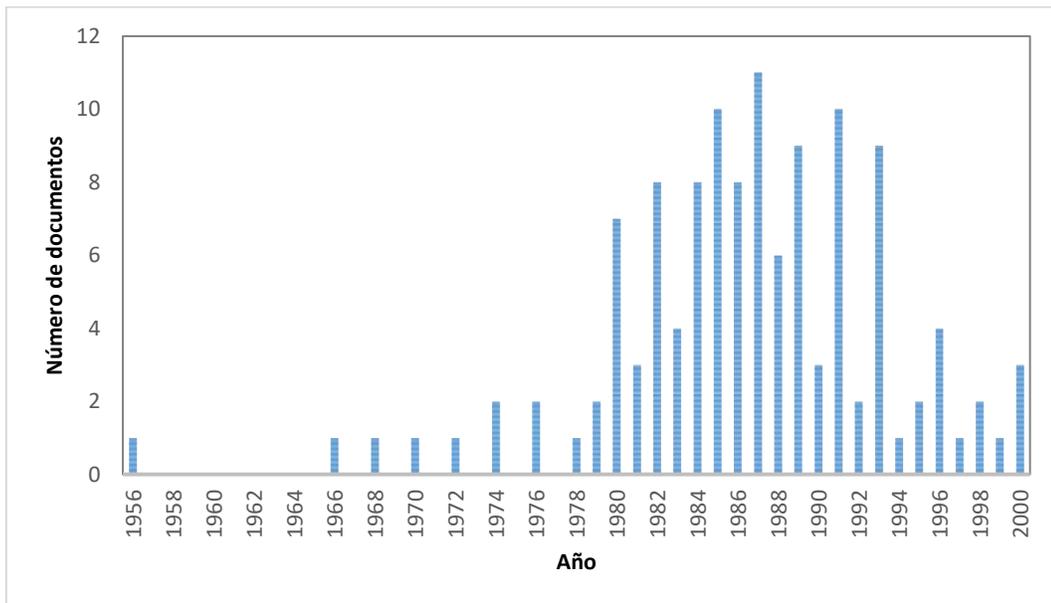


Figura 8. Publicaciones relacionadas con gas Shale (Periodo 1956-2000).

A pesar de que los tópicos relacionados al gas Shale se han mantenido con una tendencia creciente, como se aprecia en la Figura 9, durante el último año se ve una disminución en

cuanto a documentos publicados, teniendo 1257, mientras que el año anterior contaba con 1424. Esta disminución puede atribuirse a la oposición existente en ciertos países para la extracción de gas Shale, quienes han reducido sus investigaciones a este respecto.

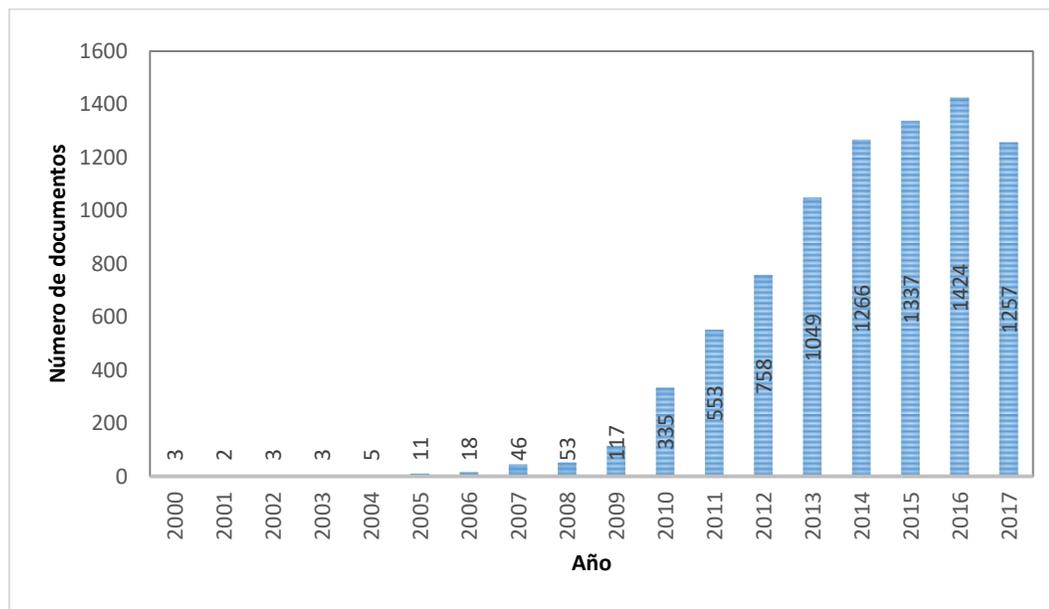


Figura 9. Publicaciones relacionadas con gas Shale en el periodo 2000–2017.

En cuanto a los tópicos de investigación en gas Shale (Figura 10), se reportan 24 áreas, donde Energía y Tierra y Ciencias Planetarias representan alrededor del 50%, mientras que otras áreas en conjunto, como Medicina, Matemáticas, Artes y Humanidades, Psicología, solo representan el 7%. Esto demuestra la relevancia que tiene al gas Shale en el sector energético internacional; también es una muestra de que existe un interés multidisciplinario en este hidrocarburo, puesto que su cadena de producción es amplia y tiene impacto en varias áreas de investigación.

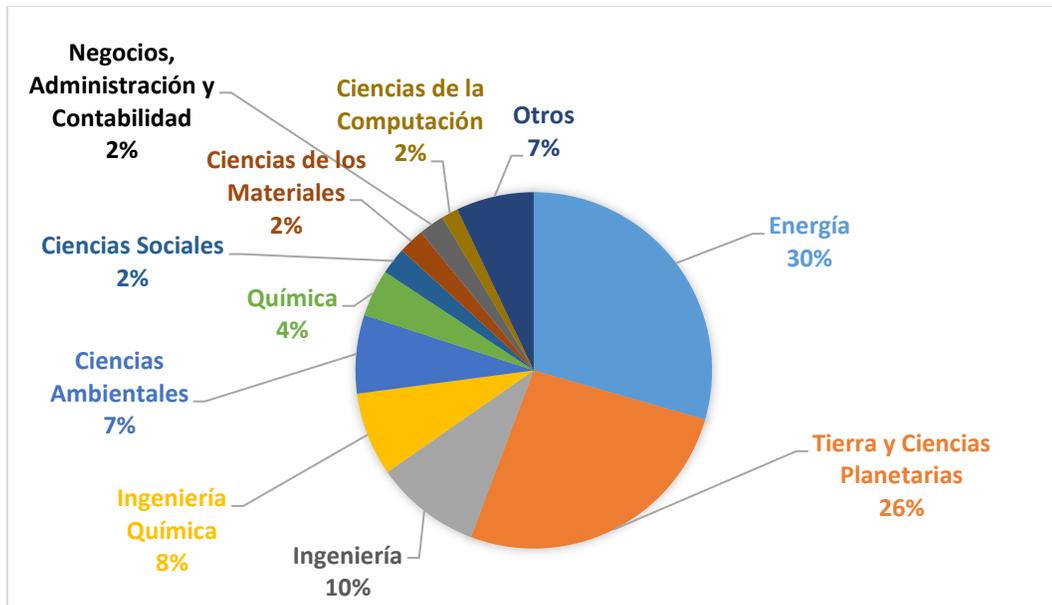


Figura 10. Clasificación de publicaciones en gas Shale por área de investigación.

A pesar de que existen grandes reservas en México, el gas Shale ha sido poco atendido dentro de la comunidad científica del país. Entre los 8361 documentos encontrados en Scopus, apenas 77 resultados muestran coincidencia con el término “México”, representando sólo el 0.9% de los registros. El primer documento data de 2008, refiriéndose a la exploración y características geológicas de los sitios donde se localizaron algunas reservas de gas Shale. A partir de ese año se puede apreciar una tendencia creciente hasta el año 2012, seguido de una disminución en los años siguientes (Figura 11). Esta disminución puede deberse a que actualmente en México el gas Shale no ha sido desarrollado completamente, por lo que no se cuenta con información suficiente sobre el mismo. En este sentido, algunos factores que pueden explicar este número de publicaciones son que existen pocos grupos de investigación que aborden la temática, la carencia de lugares activos para la toma de datos, los recursos reducidos que se destinan a la investigación de esta fuente, entre otros.

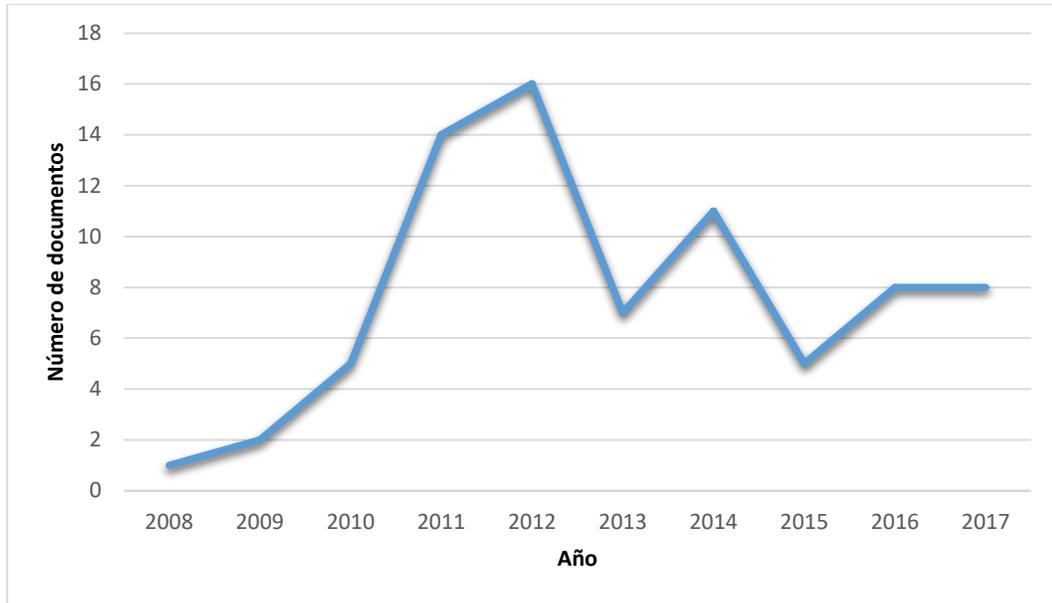


Figura 11. Documentos sobre gas Shale publicados en México.

Por otro lado, las principales áreas de investigación abordadas en México son Energía, Tierra y Ciencias Planetarias, Ingeniería y Ciencias Ambientales (Figura 12). Cabe destacar que el 42% corresponde a Energía, denotando que el gas Shale tiene un alto impacto en el sector energético, por lo que su desarrollo representa un beneficio en este sector.

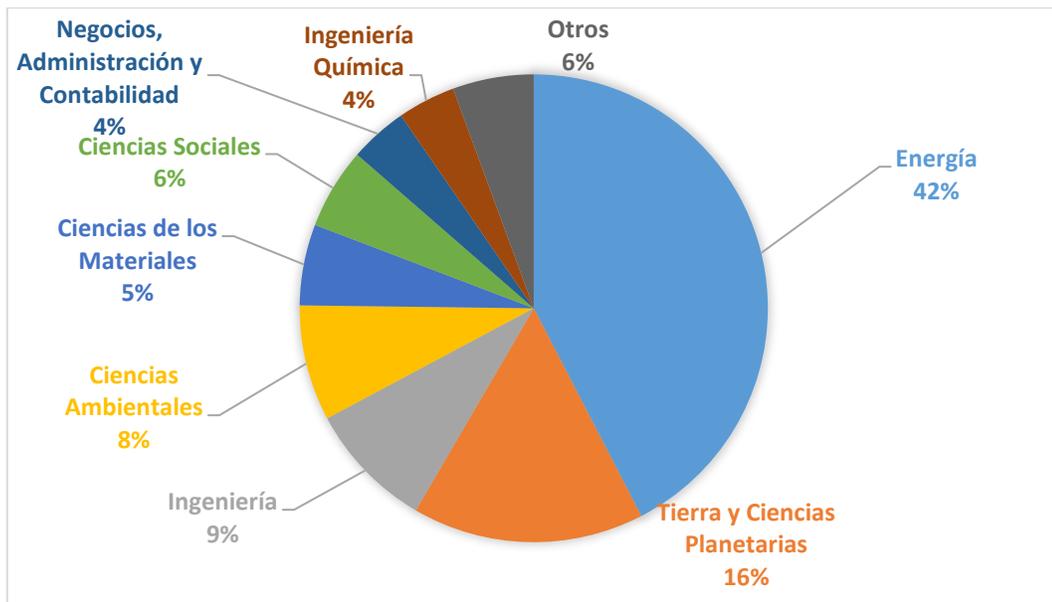


Figura 12. Clasificación de publicaciones por área de investigación en México.

Para complementar la información analizada, se recurrió al motor de búsqueda de Web of Science. En las Figuras Figura 13a y 13b, se puede observar una tendencia creciente en el número de publicaciones registradas en el periodo comprendido entre 1951 y 2017, teniendo un incremento notorio a partir del año 2012. Pese a que el número de documentos encontrado es menor al reportado por Scopus, la tendencia se mantiene al alza hasta finales del 2017, mientras que en Scopus ésta decae un poco en el último año.

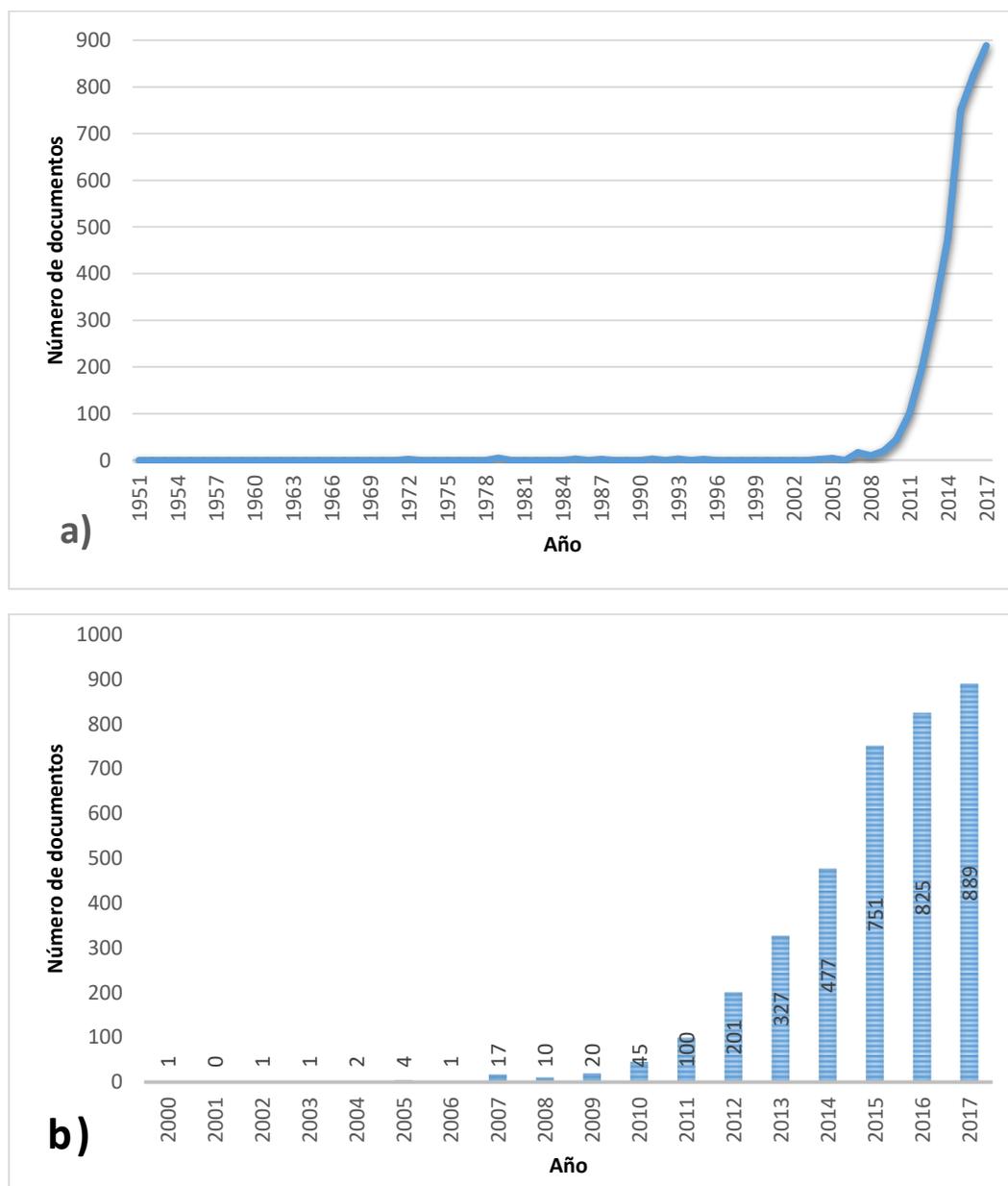


Figura 13. Tendencia en documentos científicos sobre gas Shale reportados en Web of Science: a) Tendencia total, b) Tendencia a partir del año 2000.

En cuanto a las áreas de investigación en las que se reportan documentos sobre gas Shale, Web of Science mostró 15 clasificaciones diferentes, en las que destacan Energía y Combustibles, Ingeniería Química, Geociencias, Ingeniería Ambiental, entre otros; esto se presenta en la Figura 14.

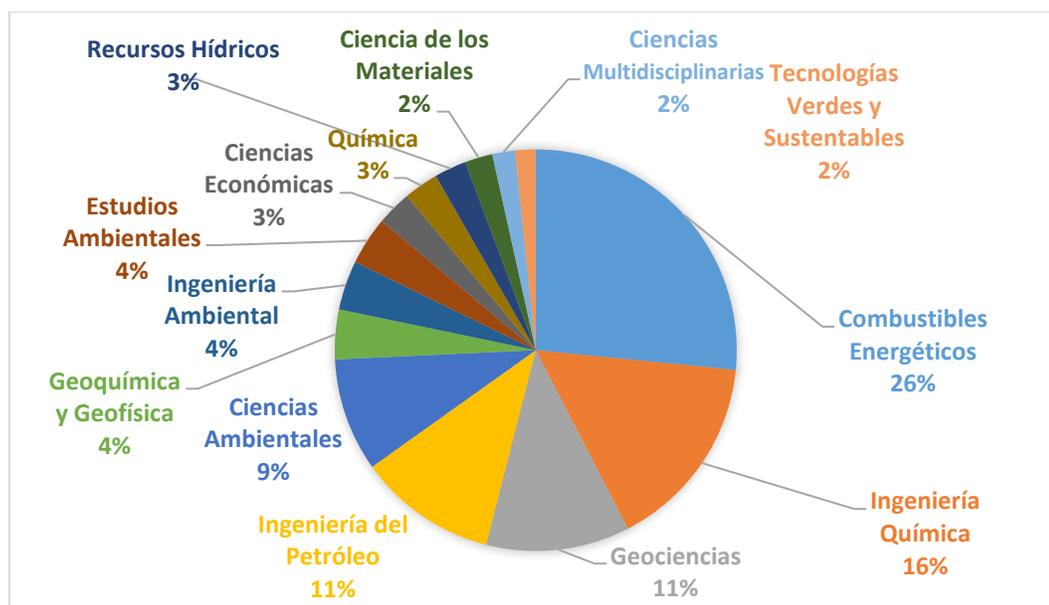


Figura 14. Áreas de investigación reportadas por Web of Science.

Para analizar el contexto nacional, se realizó una búsqueda incluyendo el término “Mexico”. Del total de documentos solo se encontraron 29 coincidencias, teniendo como año más antiguo 2008 (Figura 15). La mayoría de los documentos se clasifican dentro de las áreas de Geociencias, Energía y Combustibles y Estudios Ambientales.

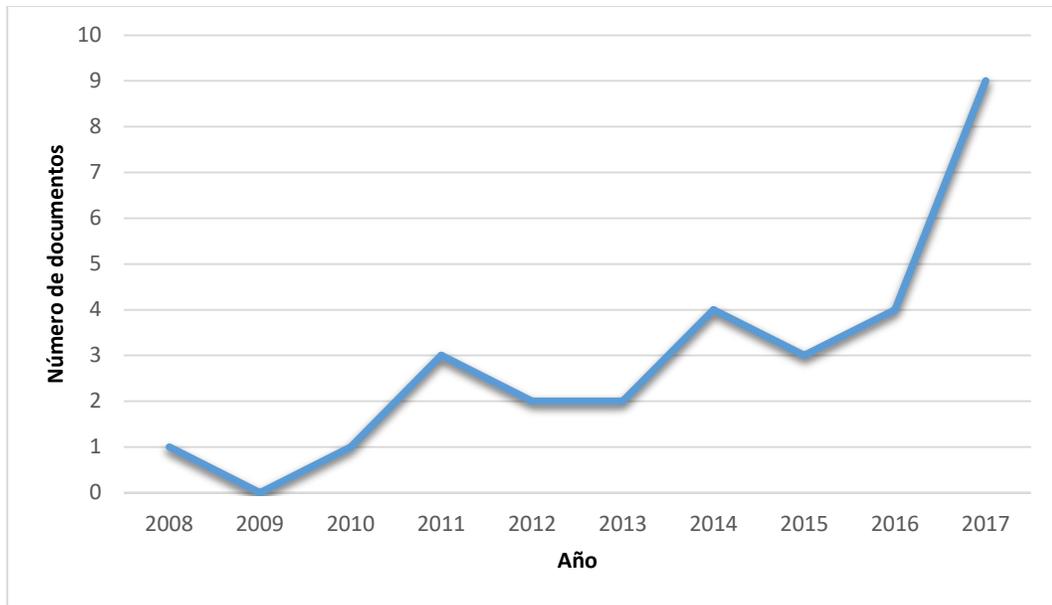


Figura 15. Tendencia de documentos con el término “Mexico”.

De los resultados obtenidos por ambas plataformas, se pudo apreciar que varios de los tópicos relacionados al gas Shale no eran tratados en la década pasada. En años recientes se ha incluido la perspectiva de otras áreas en el estudio del gas Shale debido a la preocupación por el agotamiento del petróleo, las implicaciones hacia la salud, el impacto socio-económico, además de buscar fuentes de energía menos contaminantes.

6.1.2 Información Tecnológica

En la Figura 16 se presenta el número de patentes recopilado por Scopus y Google Patents hasta finales del 2017. Scopus reportó 3065 patentes con una tendencia similar a la observada en el análisis de información científica. Es hasta 2010 cuando la tendencia creciente se observa más pronunciadamente, ya que anterior a este año sólo se reportaron 75 patentes. Durante el periodo de 2010 a 2017 la tendencia se mantuvo en aumento, obteniendo un total de 2990 patentes publicadas, lo que significa un promedio de 373 patentes por año. Con este comportamiento, se espera que el número de patentes siga creciendo en años próximos.

Se reportaron 9976 aplicaciones en Google Patents, un número mayor que las reportadas en Scopus. Una posible razón es que Google Patents indexa patentes de 17 oficinas diferentes,

mientras que Scopus solo indexa 5 oficinas. Al igual que en el caso anterior, la tendencia es creciente remarcándose el incremento a partir de 2010; antes de ese año sólo se registraron 109 patentes. Para años posteriores y hasta finales del 2017, se registraron 9867 patentes, teniendo un promedio anual de 1233. El aumento en el número de patentes en ambas plataformas puede deberse, principalmente, a los avances que se han hecho en cuanto a la búsqueda de combustibles alternos al petróleo. Esta tendencia coincide con la observada para las publicaciones científicas, lo cual implica que el conocimiento generado ha evolucionado a la transferencia de tecnología. Esta situación ha promovido el desarrollo en nuevas tecnologías extractivas de gas natural que han sido registradas como patentes.

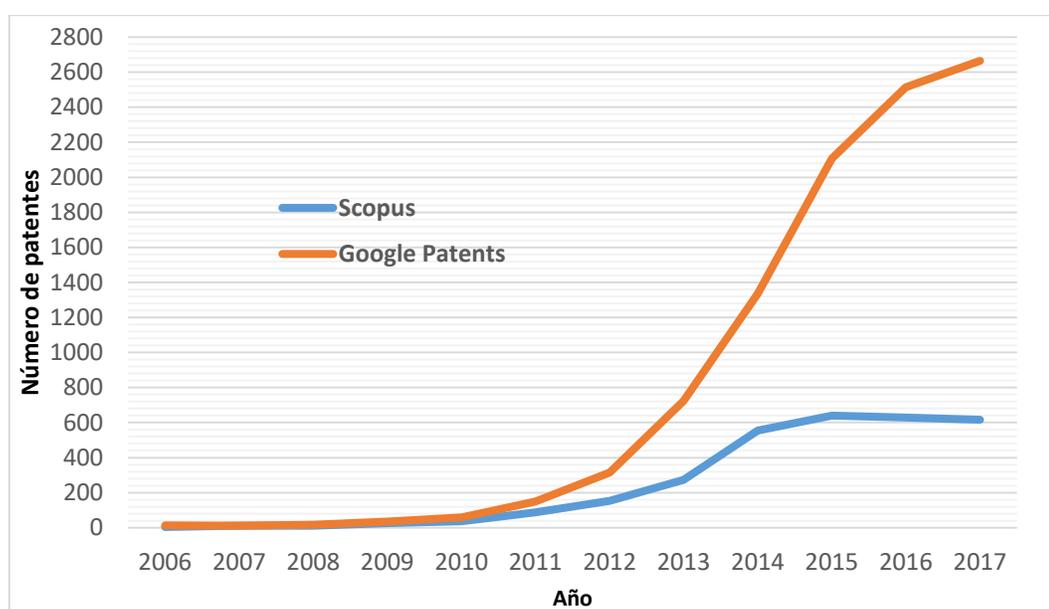


Figura 16. Publicaciones de patentes de gas Shale.

En la Figura 17 se muestra la distribución de registros en las oficinas de patentes que han adquirido un número relevante de aplicaciones en todo el mundo. La oficina que ha recibido más aplicaciones es la de China, esto quizá al hecho de que China posee la reserva más grande de gas Shale en el mundo. Además, este país cuenta con una política de aprovechamiento para este recurso. En general, la distribución del número de patentes está relacionado con el tamaño de las reservas de gas Shale que poseen los países con mayor porcentaje de aplicaciones.

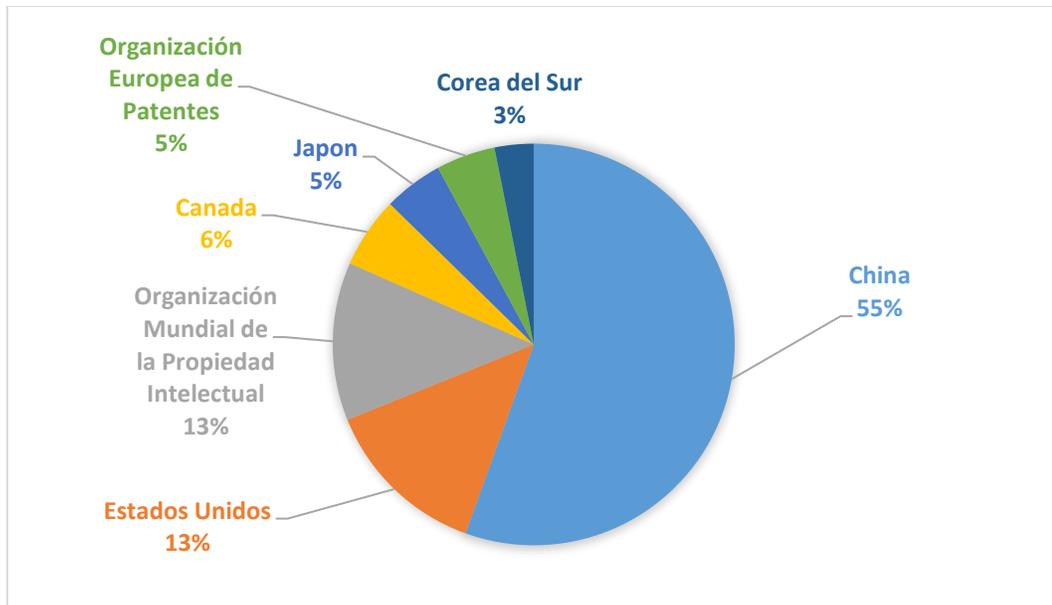


Figura 17. Distribución de registros en oficinas de patentes.

Con la finalidad de explorar las patentes emitidas en México, se concatenó el término “Mexico” a la búsqueda. El resultado indica que sólo se han registrado 87 documentos en Scopus y 108 en Google Patents (Figura 18); este es un número bajo en comparación con el total mencionado anteriormente. Se analizaron los registros de ambos motores de búsqueda y se concluyó que los resultados obtenidos no garantizan que las patentes provengan de autores mexicanos o sean aplicadas a nivel nacional. En muchos casos, el término “Mexico” solo se emplea para indicar que la patente puede tener un impacto en algún tipo de reservas encontradas en territorio mexicano o que alguna tecnología puede ser compatible y aplicable a las mismas.

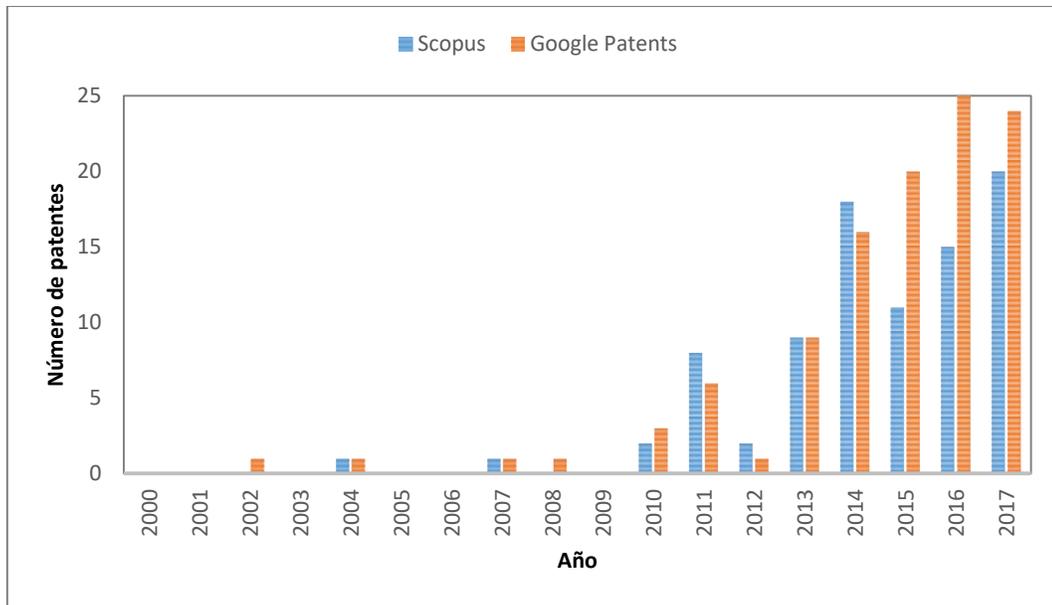


Figura 18. Tendencia de patentes con el término “Mexico”.

Por lo anterior, se procedió a realizar una búsqueda en una plataforma mexicana, como en La Gaceta de la Propiedad Industrial (SIGA) y en una plataforma de Latinoamérica, LatiPat. Dentro de ambas plataformas sólo se encontraron 21 coincidencias; en la Tabla 2 se muestran los términos empleados para la búsqueda, así como el número de resultados.

Tabla 2. Patentes registradas en SIGA y LatiPat.

Palabra Clave	LatiPat	SIGA	Total
Gas Shale	4	1	5
Gas de Lutita	0	1	1
Gas Pizarra	9	0	9
Gas de Esquisto	2	4	6
Total	15	6	21

El número de resultados obtenidos es bajo, considerando que México cuenta con grandes reservas de gas Shale en su territorio. Esta situación implica que será necesario emplear tecnología extranjera para que la explotación de gas Shale sea viable en el país. Con esto, es

claro que existe una amplia área de oportunidad para el sector científico y tecnológico nacional, con la necesidad de generación y transferencia de conocimientos en el corto y mediano plazo.

6.2 Evaluación de impacto ambiental

Como se mencionó en la descripción del ACV y en la metodología, es necesario establecer los objetivos y alcances del estudio para proceder con la conformación del inventario y el cálculo de los impactos ambientales.

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación de la metodología del ACV para el caso de la extracción del gas Shale en México.

6.2.1 Objetivo y alcance del ACV

El objetivo de este análisis fue establecer los posibles impactos ambientales de cada una de las etapas del proceso de obtención del gas Shale, mediante un Análisis de Ciclo de Vida, con lo cual se identificaron los mayores riesgos al ambiente.

Analizando diferentes y posibles alternativas, se eligió como unidad funcional para este estudio “1 pozo de gas Shale”. El motivo de esta selección es que la mayoría de la información reportada hace mención a los requerimientos necesarios para la construcción de un pozo de gas Shale. De igual manera, el análisis realizado se limitó al proceso de extracción de gas Shale; así, esta unidad facilitó la modelación y la conformación del inventario necesario.

En el presente trabajo se realizó un ACV para identificar impactos generados en el proceso de obtención de gas Shale, por lo que no se considera dentro del análisis la combustión del gas Shale. Se seleccionó de esta manera debido a que es importante determinar que daños se pueden obtener en los procesos extractivos de este hidrocarburo, aunado a que no se tiene una aportación de esta fuente al consumo de gas que se tiene actualmente debido a que no se ha aprovechado en su totalidad.

6.2.2 Inventario ACV

Para cada etapa dentro del proceso de obtención del gas Shale se identificaron datos relevantes correspondientes a entradas y salidas. A pesar de tener información útil encontrada en la literatura, fue necesario realizar algunas interpolaciones o extrapolaciones, además de la realización de algunas estimaciones para contar con la información completa para la modelación del ACV.

Entre las estimaciones realizadas para la integración del inventario está suponer que el 30% del volumen total de agua empleada para la fractura hidráulica regresa como agua residual. Es decir, sólo este porcentaje resulta altamente contaminado, requiriendo tratamientos especiales para su remediación y correcta disposición. Esta suposición se basa en la literatura [42, 43] y en estimaciones realizadas por comunicaciones personales con investigadores del Departamento de Ingeniería Civil Geológica y Ambiental de la Universidad de Saskatchewan. Otra consideración fue la del combustible empleado para la etapa de producción, tomando en cuenta que se empleó un generador de 1000 kW, el cual utiliza 138 L/h operando a media carga, por lo que se requieren aproximadamente 1000 toneladas de combustible al año. Esto implica que ésta es la etapa con mayor consumo de combustible.

Cabe destacar que para el inventario no se consideró la mano de obra, gastos e impactos provocados por trabajadores en el sitio. De igual manera, tampoco se tomó en consideración el transporte de gas fuera del sitio, tanto en el caso de tuberías o transporte, para la distribución de gas en el sector doméstico e industrial. El estudio se enfocó principalmente en los impactos generados por el proceso de extracción del gas Shale, por lo que su combustión para la generación de energía y emisiones al ambiente no se trató en el presente documento.

En la Tabla 3 se muestran los datos empleados como inventario del presente ACV.

Con la información disponible sobre uso de agua en la reserva de Texas, se estimó el volumen para el caso de México, ya que ambas reservas comparten características similares.

Tabla 3. Inventario para el ACV de la extracción del gas Shale tomando como Unidad funcional “1 pozo de gas Shale”.

Etapas	Ítem	Unidad	Valor	Referencias
Exploración	Agua	m ³	6000	Estimación c.p. y [74]
	Cemento	m ³	0.5	[47]
	Transporte	ton*km	100	Estimación c.p. y [74]
	Combustible (diésel)	kg	100	[47]
Preparación del sitio	Agua	m ³	3000	Estimación c.p. y [74]
	Combustible (diésel)	kg	1000	[47]
	Transporte	ton*km	8800	Estimación c.p. y [74]
	Tubería de acero	kg	3300	[47]
	Concreto	m ³	10	[47]
Perforación	Agua	m ³	1000	Estimación c.p. y [74]
	Combustible (diésel)	kg	100	[47]
Estimulación	Agua	m ³	50000	[45]
	Arena	ton	3750	[47]
	Combustible (diésel)	kg	1000	[47]
	Cloruro de amonio	kg	30	[19, 81]
	Cloruro de sodio	kg	50	[19, 81]
	Metanol	kg	150	[19, 81]
	Etilenglicol	kg	50	[19, 81]
	Ácido acético	kg	30	[19, 81]
	Isopropanol	kg	30	[19, 81]
	Hidróxido de sodio	kg	50	[19, 81]
	Ácido clorhídrico	kg	30	[19, 81]
	Etanol	kg	30	[19, 81]
	Acetaldehído	kg	30	[19, 81]
Producción	Combustible (diésel)	ton/año	1000	[47]
Clausura	Agua	m ³	1000	Estimación c.p. y [74]
	Combustible (diésel)	kg	100	[47]
	Concreto	m ³	3	[47]
	Metanol	kg	30	[19, 81]
	Ácido clorhídrico	kg	30	[19, 81]
	Hidróxido de sodio	kg	30	[19, 81]

c.p. comunicación personal

6.2.3 Evaluación de impactos

Como se indicó en la sección de Metodología la evaluación se realizó empleando el software SimaPro, empleando un método de impacto de punto final y uno de impacto de punto medio: *ReCiPe Endpoint* y *Ecological Scarcity*. Los resultados obtenidos a partir del método *ReCiPe Endpoint* se presentan en las Figuras 19, 21, 23 y 25. Por su parte, los resultados generados por el método *Ecological Scarcity* se muestran en las Figuras 20, 22, 24 y 26. La intención de emplear dos métodos distintos fue complementar los indicadores de cada método, obteniendo impactos inmediatos y a largo plazo de cada proceso analizado. En las tablas 4 y 5 se presentan los indicadores que cada método considera, los cuales están listados en el orden de aparición, de izquierda a derecha, en los gráficos (Figuras 19-26).

Tabla 4. Indicadores considerados en el método de cálculo *ReCiPe Endpoint*.

	Indicador		Indicador
1	Cambio climático – Salud humana	10	Ecotoxicidad terrestre
2	Agotamiento de ozono	11	Ecotoxicidad hídrica
3	Toxicidad humana	12	Ecotoxicidad marina
4	Oxidantes fotoquímicos	13	Ocupación agrícola
5	Formación de material particulado	14	Ocupación urbana
6	Radiación	15	Cambio de uso de suelo
7	Cambio climático – Ecosistemas	16	Agotamiento de metales
8	Acidificación terrestre	17	Agotamiento de recursos fósiles
9	Eutrofización		

Tabla 5. Indicadores considerados en el método de cálculo *Ecological Scarcity*.

	Indicador
1	Emisiones – Aire
2	Emisiones – Agua superficial
3	Emisiones – Agua subterránea
4	Emisiones – Suelo
5	Recursos energéticos
6	Recursos naturales
7	Desechos depositados

6.2.4 Interpretación de resultados

El esquema funcional del proceso (mostrado en la figura 6) se programó en SimaPro considerando el inventario de la Tabla 3. Posteriormente se realizaron diferentes simulaciones, las cuales arrojaron datos útiles sobre los impactos generados por los insumos del proceso de extracción de gas Shale.

En la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos del cálculo con el método *ReCiPe Endpoint* para la etapa de Exploración. Como se puede apreciar, los impactos más notorios provienen principalmente del uso de diésel (color verde en las barras de la gráfica) y cemento (color gris en las barras de la gráfica). El cemento contribuye en gran medida (superior al 50%) en 9 de los 17 indicadores: “Cambio climático–salud humana”, “radiación”, “cambio climático–ecosistemas”, “eutrofización”, “ecotoxicidad terrestre”, “ocupación agrícola”, “ocupación urbana”, “cambio de suelo” y “agotamiento de metales”. La contribución observada se debe principalmente a la amplia cadena de producción del cemento Portland, que va desde la extracción de minerales hasta la obtención de producto terminado. El diésel también presenta una alta aportación en cuanto a impactos ambientales, sobresaliendo en 6 de los 17 indicadores: “agotamiento de la capa de ozono”, “oxidantes fotoquímicos”, “eutrofización”, “ecotoxicidad terrestre”, “ecotoxicidad hídrica” y “agotamiento de recursos fósiles”. La principal causa de que el diésel ocasione estos

impactos es su combustión, ya que la mayoría de los motores empleados en maquinaria utilizada para esta etapa no logra tener una eficiencia del 100%. Esto genera la emisión de gases tóxicos al ambiente, los que, a su vez, pueden reaccionar para crear otros compuestos nocivos en la atmósfera. En cuanto al impacto ambiental provocado por el uso de transporte, su contribución no es alta, ya que sólo contribuye de manera remarcable en 2 de los 17 indicadores: “toxicidad humana” y “ecotoxicidad marina”. Los impactos asociados al transporte pueden atribuirse al uso de recursos fósiles como combustibles, ya que, como se mencionó con anterioridad, la mala combustión ocasiona algunos gases nocivos para el ambiente; estos pueden generar otros contaminantes conforme los primeros se propagan en la atmósfera mediante los diferentes ciclos naturales, como es el caso del ciclo del agua. Cabe señalar que se consideró el uso mixto de transporte, es decir, se supone el empleo de camiones impulsados por diésel y camionetas a gasolina.

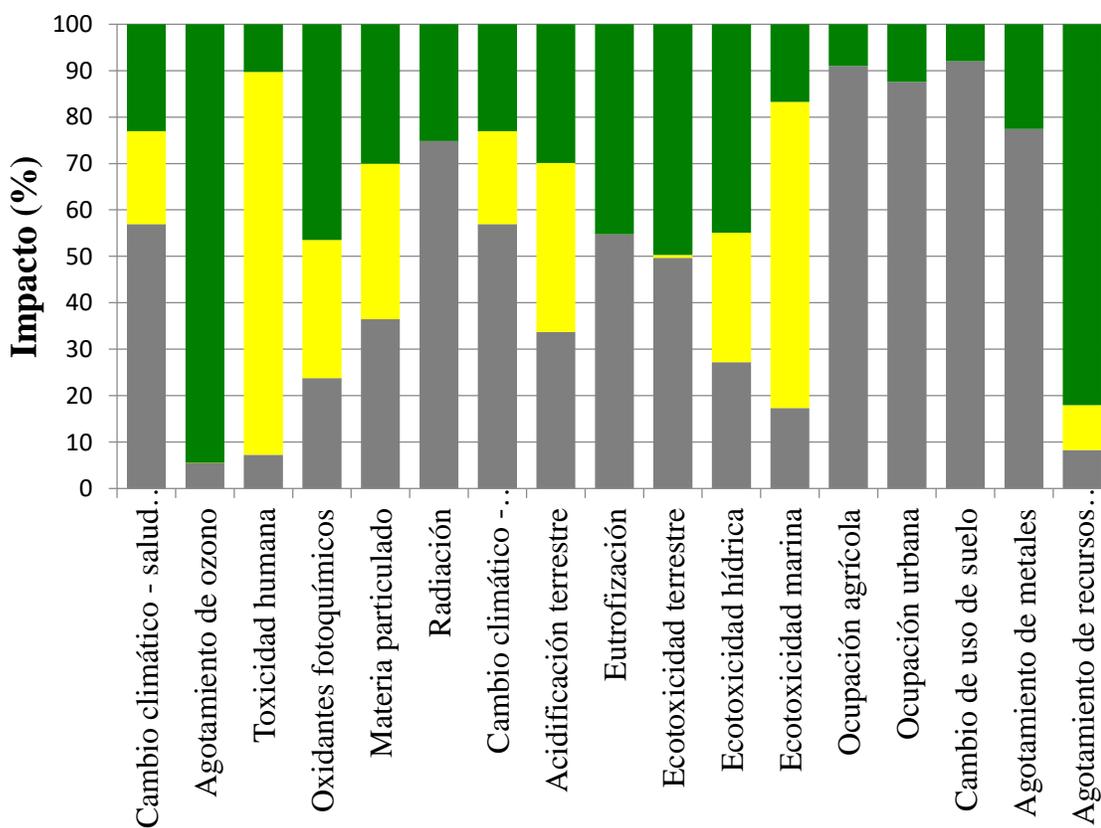


Figura 19. Resultados del *ReCiPe Endpoint* para la etapa de Exploración (■ Concreto, ■ Transporte, ■ Diésel).

Con el método *Ecological Scarcity* los resultados son similares (Figura 20), ya que también se presentó una alta contribución en el impacto al medio ambiente por parte del uso de cemento y diésel, como ocurrió con el método anterior. El cemento presenta una mayor contribución en 5 de las 7 categorías de impactos: “emisiones al aire”, “emisiones hacia aguas subterráneas”, “emisiones a suelos”, “agotamiento de recursos naturales” y “desechos depositados”. Dentro de las categorías mencionadas, se resalta el agotamiento de recursos naturales, ya que para la producción de cemento se requieren principalmente minerales, lo que ocasiona esta alta contribución en la categoría. Los demás impactos se deben, como se mencionó con anterioridad, a la cadena de producción del cemento Portland, principalmente debido al proceso de calcinación al que se somete, generando emisiones al ambiente. En el caso del diésel, éste contribuye mayoritariamente en 3 de las 7 categorías de impacto: “emisiones hacia aguas superficiales”, “emisiones a suelos” y “recursos energéticos”. El diésel es una fuente esencial para la producción de energía, por lo que genera el mayor impacto en la categoría de recursos energéticos, ya que es empleado para impulsar la mayoría de la maquinaria empleada en esta etapa. En cuanto a la carga del uso de transporte, este representa una aportación pequeña, presentándose sólo en 3 categorías.

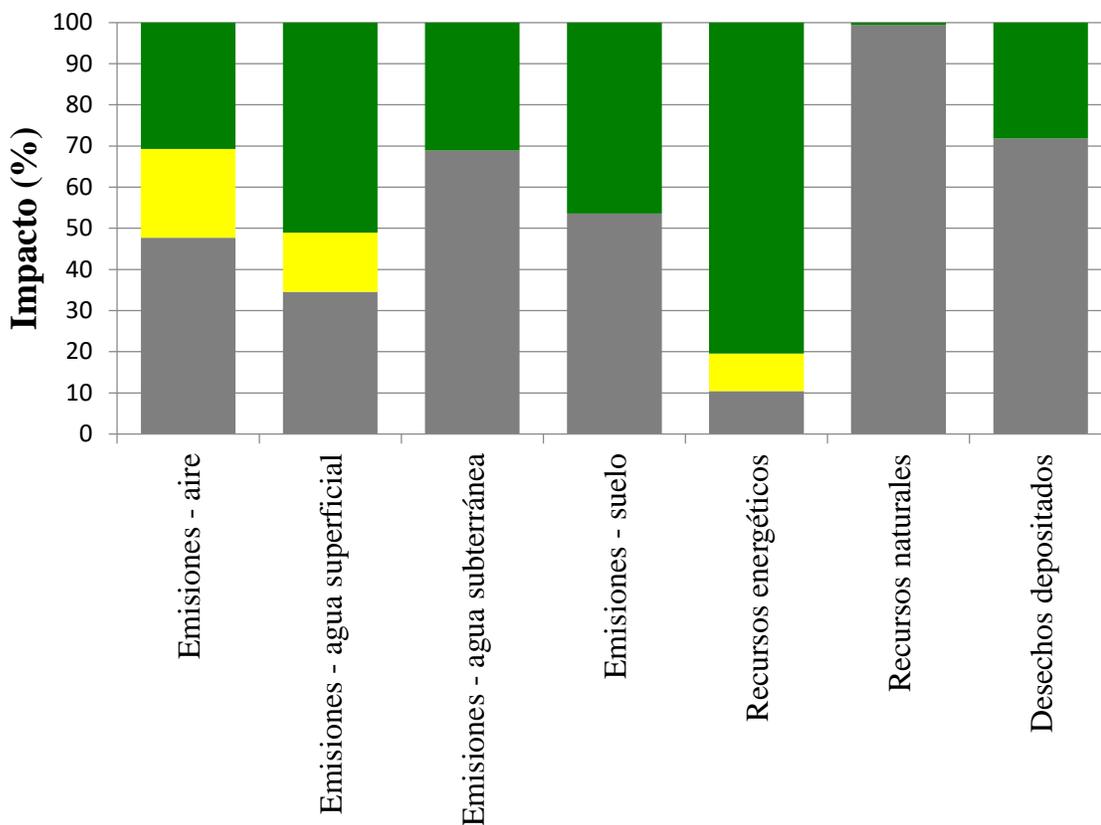


Figura 20. Resultados del *Ecological Scarcity* para la etapa de Exploración (■ Concreto, ■ Transporte, ■ Diésel).

Para la siguiente etapa, la Preparación del sitio, se requieren algunos materiales adicionales, además de una mayor cantidad de los mismos, ya que el sitio debe ser acondicionado para que se pueda operar adecuadamente sin complicaciones. Empleando el método de *ReCiPe Endpoint*, se muestra que los impactos ambientales provienen principalmente del uso de cemento y de la tubería de acero, apreciable en la Figura 21. La contribución del uso de la tubería de acero destaca en 8 de las 17 categorías: “Cambio climático–salud humana”, “oxidantes fotoquímicos”, “formación de material particulado”, “cambio climático–ecosistemas”, “acidificación terrestre”, “ecotoxicidad terrestre”, “agotamiento de metales” y “agotamiento de recursos fósiles”. La principal razón de esta situación se debe a que el proceso de producción de acero es complejo, ya que se requieren recursos naturales como minerales y agua, además de un alto consumo de energía, generada con la combustión de recursos fósiles. En esta etapa, el cemento contribuye en 5 de las 17 categorías: “radiación”, “eutrofización”, “ocupación agrícola”, “ocupación urbana” y “cambio de suelo”. Como se

mencionó en la primera etapa, la contribución del cemento se debe a su proceso de producción, generando impactos ambientales durante la Preparación del sitio. Para el caso del diésel, éste solo tiene un alto impacto (~90%) en la categoría “agotamiento de la capa de ozono”, esto debido a su combustión; mientras que tiene un impacto medio (~10-35%) en 5 categorías y un impacto menor (<10%) en el resto. Durante esta etapa, es necesario el uso de transporte pesado para acarrear el material para preparar el sitio; además se requiere transporte regular para el traslado de personal. El uso de transporte pesado tiene un alto impacto (~70%) en la categoría “toxicidad humana” e impacto medio (~20-40%) en “ecotoxicidad hídrica” y “ecotoxicidad marina”. La principal causa atribuida a estos impactos son las emisiones generadas al ambiente por la combustión de diésel. En cuanto al uso de transporte ligero, éste representa un impacto mínimo (<10%) en 4 de las 17 categorías, de nueva cuenta por la combustión del diésel.

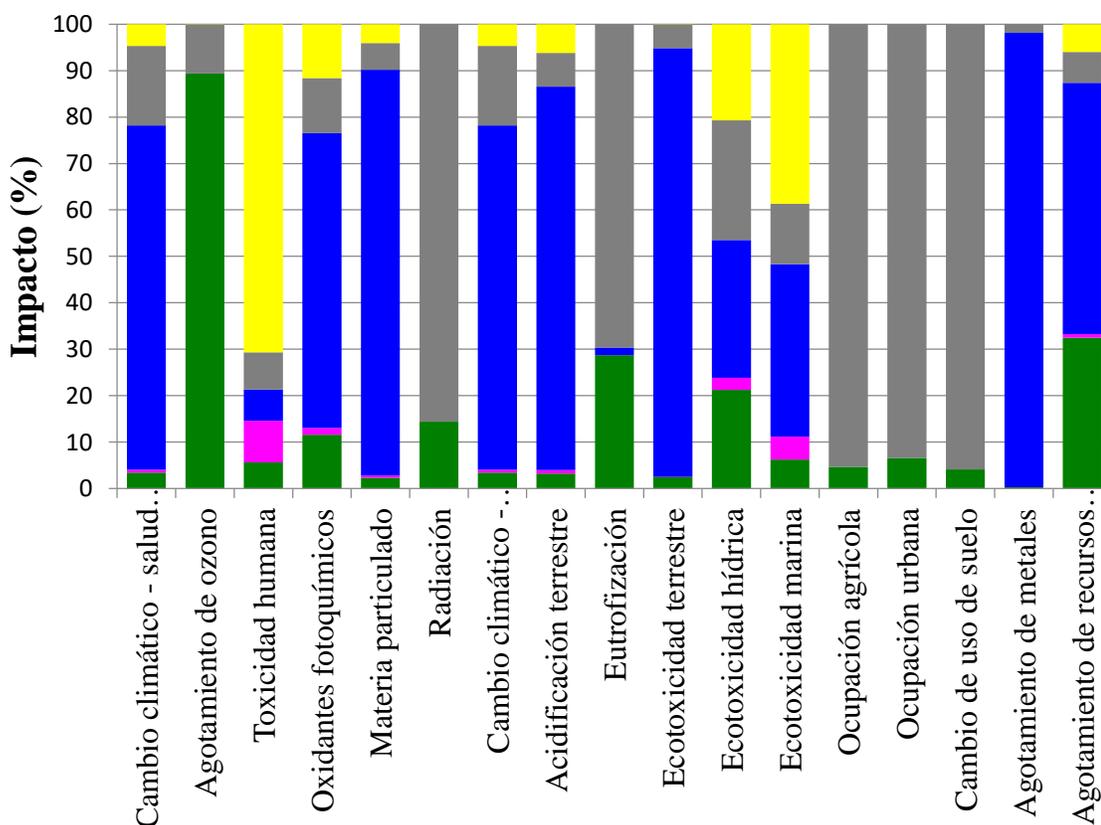


Figura 21. Resultados del *ReCiPe Endpoint* para la etapa de Preparación del sitio (■ Transporte ligero, ■ Concreto, ■ Diésel, ■ Acero, ■ Transporte pesado).

En la Figura 22 se muestran los resultados obtenidos con el método *Ecological Scarcity*. Se observa que el cemento es el que tiene mayor contribución, teniendo presencia alta (~50-98%) en 4 de las 7 categorías: “emisiones hacia agua superficial”, “emisiones a suelos”, “agotamiento de recursos naturales” y “desechos depositados”. Nuevamente, estos impactos son producto del proceso de producción del cemento, lo cual principalmente agota recursos naturales. El proceso de producción de las tuberías de acero genera altos impactos ambientales, principalmente emisiones a la atmósfera y hacia aguas subterráneas. El diésel solo tiene alto impacto (~70%) en 1 categoría (“recursos energéticos”), impacto medio en 3 (15-35%), mínimo en 1 (<10%) y sin carga ambiental en las 2 categorías restantes. Así mismo, el uso de transporte pesado sólo tiene impacto de medio a ligero en 3 categorías y el transporte ligero tiene un mínimo impacto, presentándose sólo en 2 categorías, siendo apenas visible.

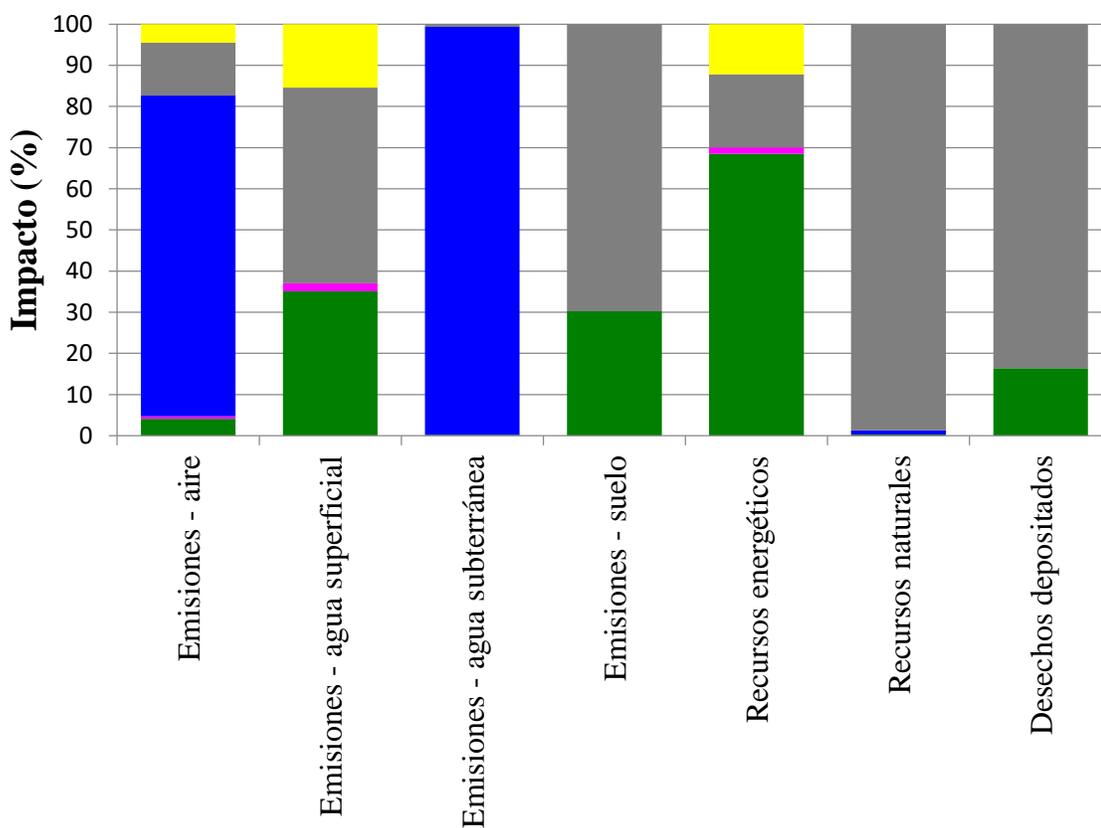


Figura 22. Resultados del *Ecological Scarcity* para la etapa de Preparación del sitio (Transporte ligero, Concreto, Diésel, Acero, Transporte pesado).

El Perforado realizado directamente en el yacimiento (Etapa 3) requiere solamente diésel como insumo para el funcionamiento del taladro. Con lo anterior, los cálculos realizados con ambos métodos para esta etapa sólo presentan contribución por parte de la combustión del diésel. Por lo anterior, las gráficas de los resultados de esta etapa no se incluyeron en el presente documento, teniendo como conocimiento que la combustión del diésel afecta principalmente a la atmósfera debido a la emisión de gases contaminantes.

Siguiendo con el proceso de extracción del gas Shale, la siguiente etapa es la Estimulación, la cual representa el mayor riesgo ambiental debido al empleo de insumos como compuestos químicos, arena y agua, componentes clave para el fluido de fractura.

Empleando el método *ReCiPe Endpoint* (Figura 23), en conjunto, los compuestos químicos representan la mayor carga ambiental, ya que de las 17 categorías tienen un alto impacto en 10, dejando el resto de categorías con una alta contribución para el diésel. Si bien, individualmente cada compuesto químico no representa una alta contribución a impactos ambientales, se puede apreciar que algunos compuestos, como el ácido clorhídrico, el etilenglicol y el ácido acético, presentan un mayor grado de contribución que otros compuestos. De igual manera, se puede apreciar que el agua residual contribuye en 5 categorías, debido principalmente a la formación de sales y lodos una vez que se empleó para el proceso de fractura hidráulica. Los impactos generados por los compuestos químicos se deben a que, en conjunto, estos pueden reaccionar con el entorno en diferentes condiciones; con esto se pueden transportar a otros sitios mediante condiciones climáticas como en corrientes de aire o por ciclos naturales como el ciclo del agua. Por otra parte, el diésel contribuye en 7 categorías de impacto ambiental; como se ha ido mencionando, esto es producto de las emisiones generadas por la combustión de este combustible en maquinaria empleada en el sitio.

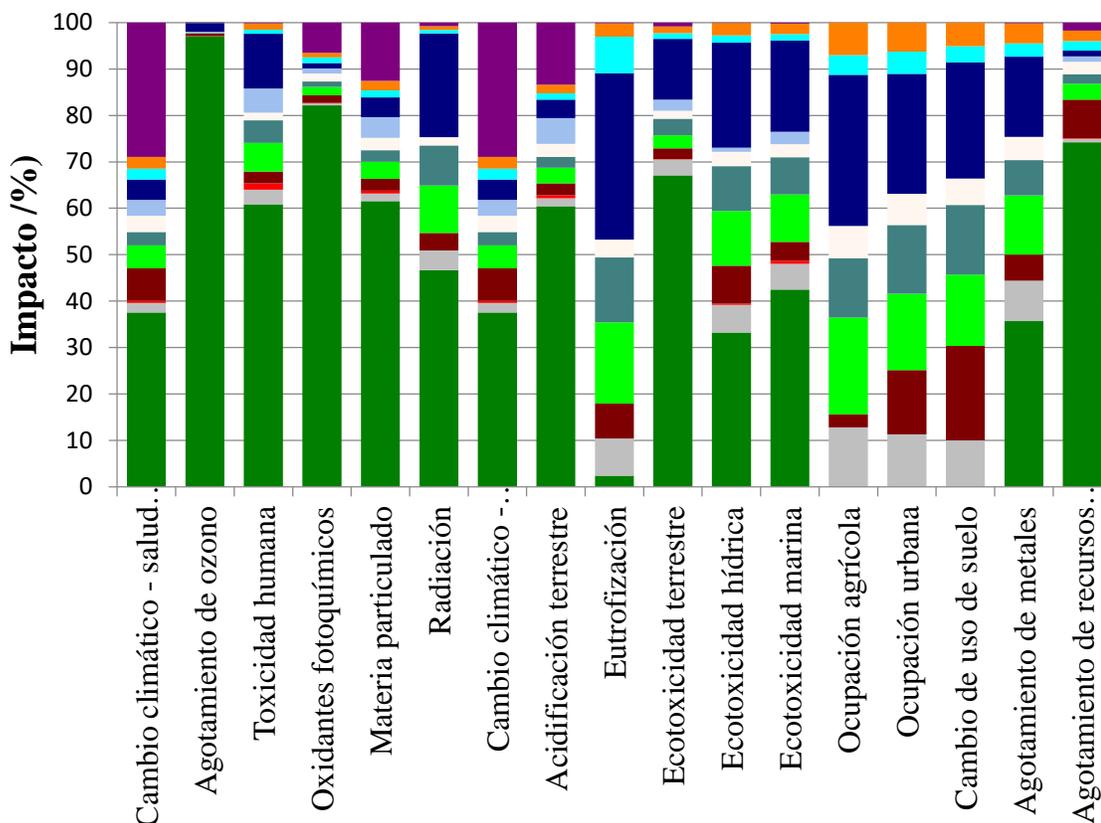


Figura 23. Resultados del método *ReCiPe Endpoint* para la etapa de Estimulación (■ NH_4Cl , ■ Metanol, ■ Ac. acético, ■ NaOH, ■ Etanol, ■ Agua residual, ■ Diésel, ■ NaCl, ■ Etilenglicol, ■ Isopropanol, ■ HCl, ■ Acetaldehído).

En la Figura 24 se muestran los resultados obtenidos con el método *Ecological Scarcity*. Similar al caso anterior, los compuestos químicos tienen la mayor contribución, presentándose en un nivel alto en 4 de las 7 categorías: “emisiones hacia agua superficial”, “emisiones al suelo”, “recursos energéticos” y “desechos depositados”. El diésel se encuentra presente en 3 categorías, teniendo alto impacto en dos de ellas, y siendo de medio impacto en la restante. En este método en particular, el agua residual tiene una carga elevada en la categoría “emisiones hacia aguas subterráneas”, esto debido principalmente a que se inyecta agua en el pozo para la creación de fisuras y que el gas quede libre. Se atribuye esta carga ambiental elevada debido a que, si no se sigue una preparación adecuada en la preparación del sitio, específicamente en las barreras alrededor del pozo, es posible que existan fugas que puedan migrar hacia mantos freáticos cercanos al sitio. Otro aspecto importante observado en los resultados, en la categoría “recursos naturales”, es que

el agua residual aporta un efecto con valores negativos, alrededor de -20%. Lo anterior se atribuye a que el agua residual recibirá un tratamiento especial, por lo que una vez finalizado el proceso, parte del agua residual será purificada y se reincorporará al ambiente, convirtiendo un impacto negativo en uno positivo; es por ello que la carga se representa con un porcentaje negativo. El resto del agua residual quedará en condiciones suficientes para ser empleada en un nuevo proceso de fractura hidráulica u otros procesos que no requieran una purificación elevada de agua.

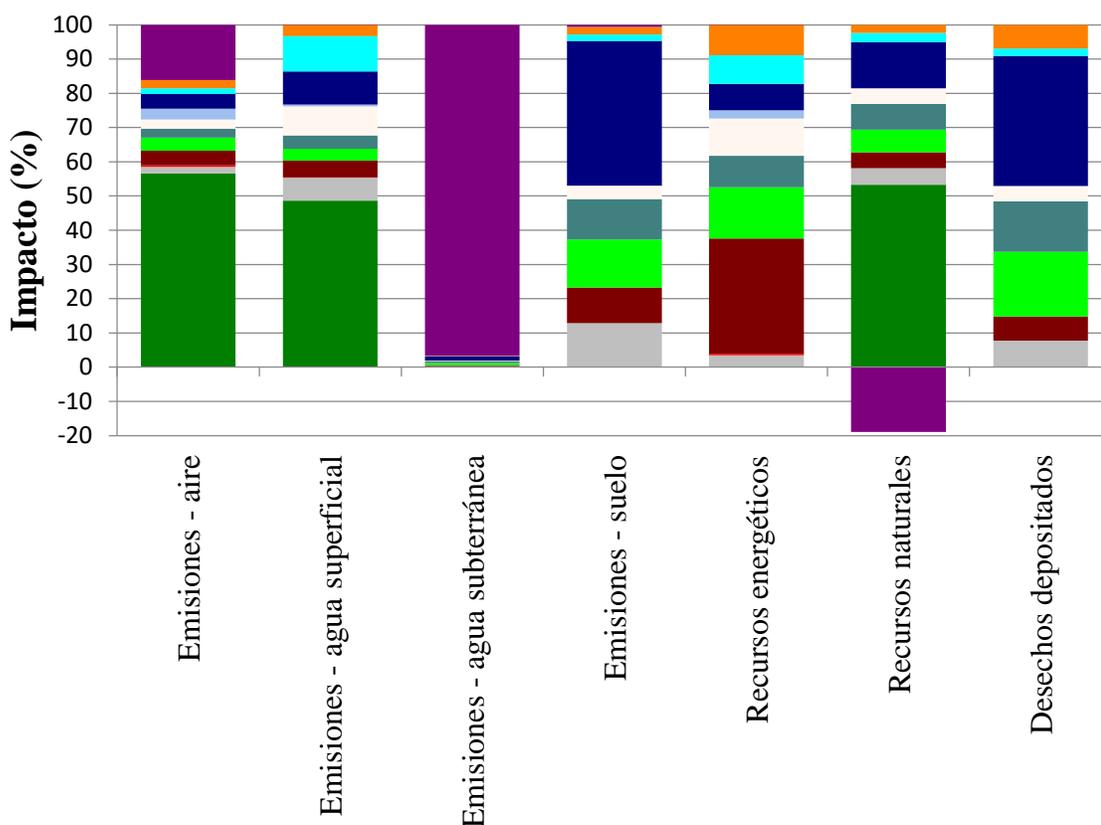


Figura 24. Resultados del método *Ecological Scarcity* para la etapa de Estimulación (■ NH₄Cl, ■ Metanol, ■ Ac. acético, ■ NaOH, ■ Etanol, ■ Agua residual, ■ Diésel, ■ NaCl, ■ Etilenglicol, ■ Isopropanol, ■ HCl, ■ Acetaldehído).

La etapa de estimulación arroja resultados basados en estimaciones. Es necesario contar con información real sobre la cantidad exacta empleada para esta etapa, principalmente los compuestos químicos empleados, la cantidad que se adiciona a la mezcla de estimulación, además de la cantidad de arena empleada por pozo.

Como ocurrió con la Etapa 3 (Perforación), en la Etapa 5 (Explotación y producción de gas Shale en el pozo) únicamente se requiere combustible como insumo. Considerando que la maquinaria empleada trabajará a base de la combustión de diésel, se necesita una gran cantidad de combustible. Lo anterior se debe a que esta etapa tiene una larga duración, aproximadamente treinta años. Así, se infiere que las contribuciones ambientales serán debido a la combustión de diésel, generando gases contaminantes al ambiente. Por esta razón los resultados gráficos de cálculo de cada método sólo mostraron aportación por parte del diésel. Debido a esto, dichos gráficos no se muestran en los resultados obtenidos en este documento.

Para finalizar el proceso bajo estudio, los resultados de la etapa de Clausura con el método de *ReCiPe Endpoint* se muestran en la Figura 25. A pesar de ser un proceso final, aun se requieren algunos insumos, principalmente para restablecer el sitio a su estado original. De las 17 categorías, 12 tienen una aportación elevada por parte del cemento. Este insumo sirve para sellar el yacimiento y así evitar fugas de gas remanente; como se indicó anteriormente, su proceso de producción representa un gran impacto ambiental. Asimismo, el “agotamiento de la capa de ozono” es la principal categoría donde el diésel aporta una carga elevada, seguida por una carga media en “agotamiento de recursos fósiles”. Por parte de los compuestos químicos empleados, el ácido clorhídrico tiene impacto de nivel medio; también, es apreciable su contribución en los resultados debido a las interacciones que existen con el medio ambiente, además de crear productos secundarios al reaccionar con otros elementos encontrados en la naturaleza y transportarse por medio de fenómenos climatológicos.

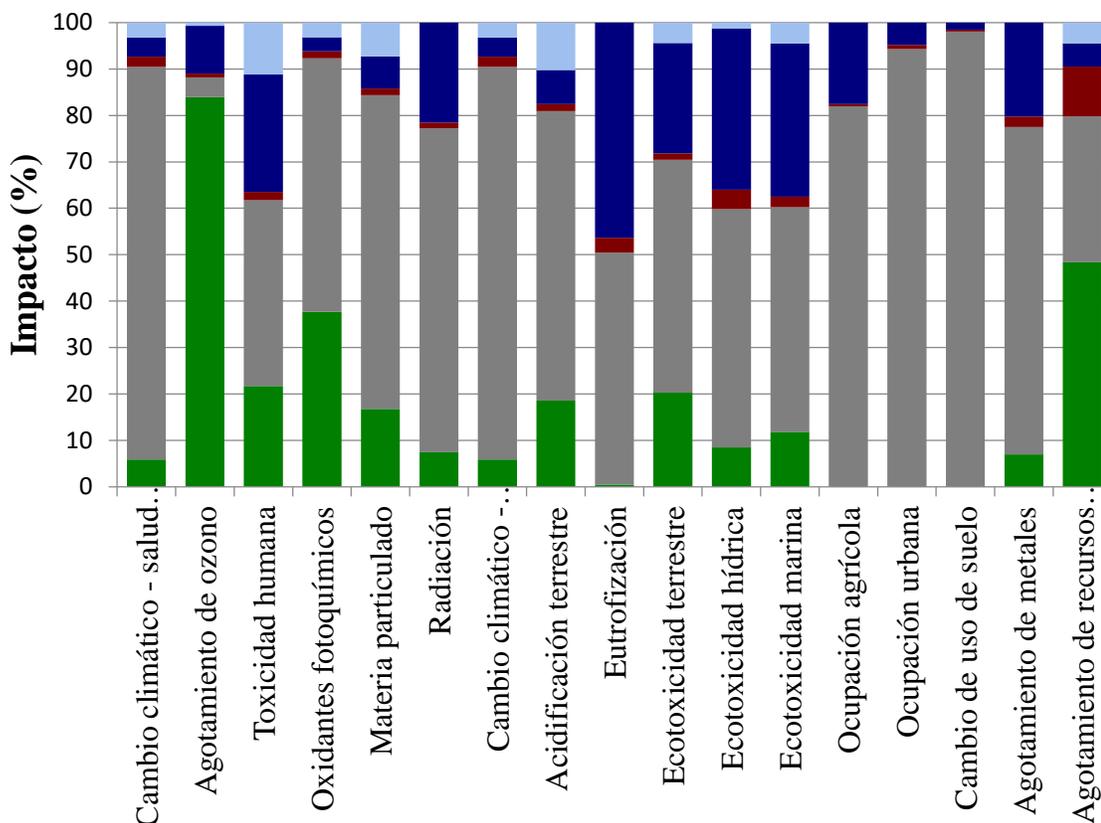


Figura 25. Resultados del método *ReCiPe Endpoint* para la etapa de Clausura (Concreto, HCl, Diésel, Metanol, NaOH).

En el caso del método *Ecological Scarcity*, el cemento tiene la mayor contribución en todas las categorías que se evaluaron para la etapa de Clausura, como se observa en la Figura 26. Como se mencionó a lo largo de la discusión de resultados, el proceso de producción del cemento Portland es amplio y complejo, además esta etapa es donde se requiere una mayor cantidad para sellar el pozo. Seguido del cemento, el ácido clorhídrico tiene una contribución media en 4 de las 7 categorías: “emisiones hacia agua superficial”, “emisiones hacia agua subterránea”, “emisiones al suelo” y “residuos depositados”. A pesar de que el uso de este compuesto químico es para dar una limpieza a residuos dentro del pozo, si no se usa la cantidad adecuada, es posible que el exceso reaccione con el ambiente, ocasionando subproductos que afecten de manera negativa al medio ambiente. En esta etapa el diésel presenta una contribución mínima, teniendo presencia en 2 de las 7 categorías, esto principalmente a que no se requiere de mucha maquinaria para la clausura del pozo.

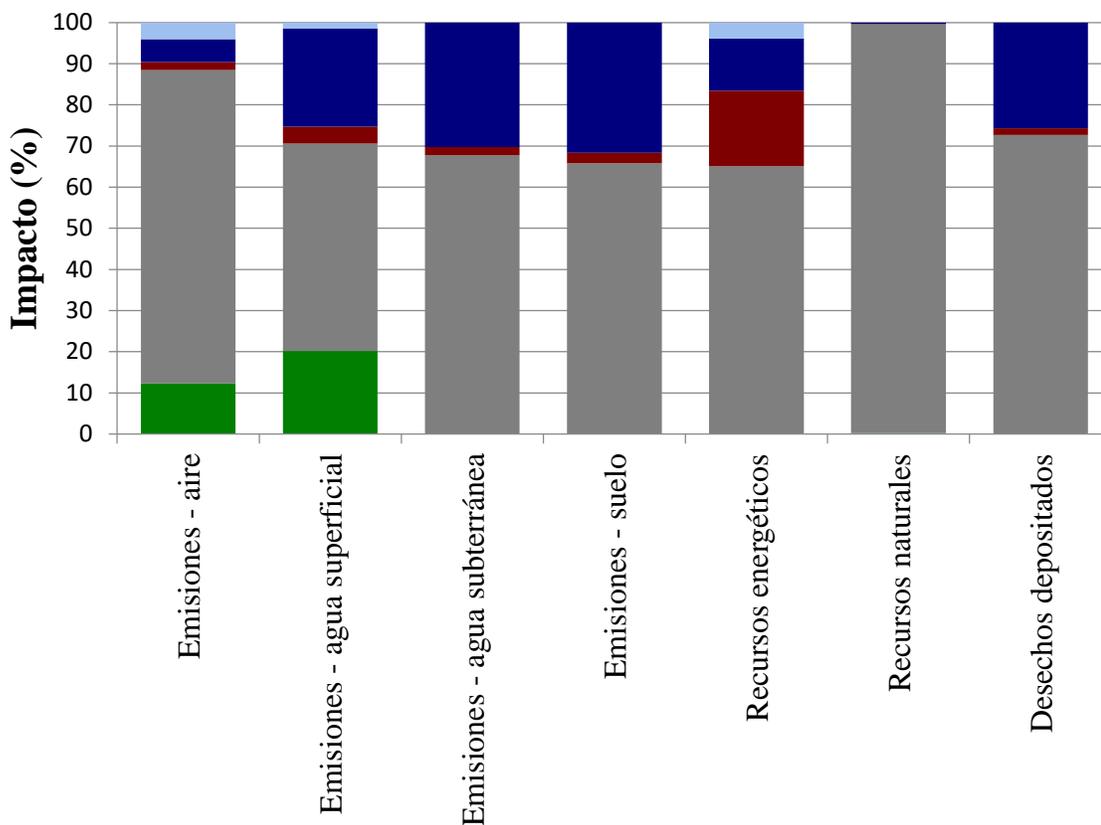


Figura 26. Resultados del método *Ecological Scarcity* para la etapa de Clausura (Concreto, HCl, Diésel, Metanol, NaOH).

6.2.5 Discusión de resultados

Se han realizado estudios previos que emplean un ACV para determinar los impactos generados por el uso del gas Shale, así como efectos de procesos de extracción [66, 71]. Muchos de estos análisis se enfocan en la combustión del hidrocarburo para la generación de energía, por lo que toman en consideración procesos posteriores a su extracción de los yacimientos; se contabilizan actividades como la construcción de líneas de distribución a sectores domésticos e industriales, así como su distribución mediante pipas. Se monitorean las emisiones generadas a la atmósfera cuando se emplea gas Shale en maquinaria, comparándose con otras fuentes de energía, como gasolina o carbón, incluso con algunas energías alternativas como la energía eólica.

De los resultados obtenidos en el ACV, se deduce que el diésel y algunos compuestos químicos son los insumos que más contribuyen a impactos ambientales, mientras que otros

como el cemento y la tubería de acero presentan una contribución elevada debido a su proceso de producción. Las etapas de Preparación del sitio, Perforación y Estimulación (donde se incluye la fractura hidráulica) son las que más emplean estos insumos, por lo que son las que presentan impactos ambientales mayores. Esto concuerda con lo reportado en el análisis de Liu y Ramirez [73], donde se concluye que varios autores coinciden en que la fractura y las etapas de trabajo subterráneo presentan los mayores impactos ambientales, prestando mayor atención al potencial de calentamiento de global. Este indicador no se incluye en los métodos empleados en esta tesis; no obstante, se utiliza el Potencial de cambio climático (*ReCiPe*) y Emisiones al aire (*Ecological Scarcity*), los cuales guardan relación con el Potencial de calentamiento global; en ambos casos, el cemento, el diésel y el acero de las etapas de Preparación del sitio, Perforación y Estimulación son los insumos que mayor contribución presentan.

También, Jaballah y Ammar [75] obtuvieron que la etapa de Desarrollo de la plataforma (construcción de pozo, fractura hidráulica y estimulación), que corresponde a las fases de Perforación y de Estimulación de esta tesis, es la que más contribuye en el impacto global del aprovechamiento del gas Shale, lo cual es acorde con lo encontrado en el ACV aquí presentado. A diferencia de lo encontrado en esta tesis, en [75] se obtuvo que la Preparación del sitio y la Clausura presentan las menores contribuciones, consideradas marginales por los autores. Esta situación se debe probablemente a la diferencia de procesos considerados en ambas etapas; así mismo, en este estudio se considera una etapa de Clausura más larga.

Por otro lado, Wang y colaboradores [77] reportaron que como la etapa de Perforación es la que más energía consume (especialmente diésel), se trata de la que mayor impacto ambiental representa, seguida de la Fractura y construcción de la plataforma; adicionalmente se identificó que la mayor proporción del uso de energía corresponde a los procesos de fabricación y transporte de insumos. Esto difiere ligeramente con los resultados de este trabajo, ya que aunque en la Perforación, el diésel es el principal causante de impactos ambientales, en la etapa de Estimulación son los materiales químicos los que mayor contribución tienen en el impacto ambiental. Una posible razón de esta situación es que el estudio de Wang se centra en el uso de energía y no tanto en los insumos.

Finalmente, Tagliaferri y colaboradores [76] concluyeron que el proceso de obtención de arena y agua para fluidos de fractura provocan los principales impactos sobre el uso y la contaminación del agua, lo cual se engloba en la etapa de Fractura hidráulica. En esta tesis se encontró que el mayor impacto sobre el uso de agua (asociado con el agua residual en las Figuras 23 y 24) es en la etapa de estimulación (que incluye la fractura hidráulica); no obstante, los impactos son provocados principalmente por los compuestos químicos y no tanto por los procesos de extracción de arena.

Cabe señalar que en la mayoría de los documentos analizados, la unidad funcional se relaciona con la energía del gas Shale y se define como 1 MJ, mientras que en este estudio se utilizó una unidad funcional asociada al proceso de producción (específicamente a los insumos): 1 pozo. A pesar de ello, los resultados obtenidos en este trabajo son similares a los reportados en la literatura. Esto demuestra la validez tanto de la metodología como de los datos empleados para el análisis del ciclo de vida del gas Shale en México.

Para eliminar las ambigüedades relacionadas con la extracción y aprovechamiento de fuentes no convencionales, varios autores aconsejan la obtención de datos precisos y completos para un análisis más confiable, lo cual solo se conseguirá mediante una mejor distribución de la información sobre procesos industriales en el ámbito de recursos fósiles.

6.3 Propuestas de desarrollo

Con base en los resultados obtenidos y en la experiencia de otras investigaciones, se pueden establecer algunas propuestas de desarrollo, con lo cual se pueden obtener mejores resultados en el proceso de extracción del gas Shale. Con estas propuestas se planea un desarrollo sustentable que podría minimizar la generación de efectos adversos para el medio ambiente, considerando mejores prácticas e implementándolas adecuadamente. A continuación, se mencionan algunas propuestas de desarrollo para la extracción del gas Shale en México:

- Se debe construir una barrera alrededor de la tubería que conecta la superficie con el yacimiento, con el fin de evitar fugas y derrames a los alrededores.

- Si se encuentra un manto freático cerca de un yacimiento, es conveniente que se construya una barrera cerca de éste, con el fin de evitar que posibles fugas lleguen a contaminar fuentes de agua potable.
- El agua residual debe ser tratada especialmente para que su pureza sea aceptable para otras actividades, como el riego agrícola.
- Si se realizara la fractura hidráulica en diferentes sitios cercanos, se recomienda reutilizar el agua, al menos 2 veces después de un tratamiento parcial de la misma, para tener una estimulación eficiente en el sitio.
- Destinar parte del gas extraído para impulsar a la maquinaria necesaria en el sitio de extracción, con el fin de reducir el consumo de diésel y disminuir las emisiones de su combustión.
- Realizar el proceso de clausura con precaución de no dejar residuos que puedan esparcirse en el sitio y sus alrededores, además de realizarse en un periodo no mayor a 3 años.
- Efectuar el proceso de restauración del sitio óptimamente, aplicando un monitoreo continuo del mismo para lograr esta actividad de manera exitosa.
- Considerar la sustitución de algunos insumos, por ejemplo el cemento Portland, por algún material cementoso sustentable.

7. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos del ACV, se concluyó que el uso de diésel y cemento representa el mayor reto en cuanto a impactos ambientales en el proceso de extracción del gas Shale. Es en este sentido en donde se presentan las principales áreas de oportunidad para la mejora del proceso, teniendo la oportunidad de implementar un desarrollo sustentable. Con lo anterior, se visualizó el optimizar el empleo de estos recursos de manera sustentable y con un aprovechamiento sin grandes daños ambientales. También existe la posibilidad de emplear insumos alternativos que ocasionen menos daños al medio ambiente, como biocombustibles y cementos sustentables.

Se identificó también que el uso de agua, pese a requerir grandes volúmenes, sólo alrededor de un tercio resulta tener un grado alto de contaminación. Este volumen requiere de procesos de remediación específicos para su óptima limpieza, recuperando así la calidad necesaria para su empleo en otras actividades.

Para complementar los resultados obtenidos en el presente estudio, es necesario corroborar algunos de los datos empleados en el inventario. De igual manera, la obtención de datos específicos de pozos reales también resulta en una aproximación más cercana sobre los impactos generados en el pozo considerado.

Adicionalmente, se debe considerar que existen algunas limitaciones en el análisis en cuanto al impacto *in situ* de las actividades realizadas por la industria del gas, como el impacto resultante del cambio de uso de suelo en donde se realizará el pozo de extracción del gas Shale. Lo anterior resulta de gran interés para este tipo de análisis, ya que existe poca o nula información sobre el impacto generado por este tipo de actividades en el sitio.

8. Trabajo futuro

Cabe mencionar que este trabajo de tesis se desarrolló dentro del proyecto 151202 “Instrumentación del Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en materia de Hidrocarburos no convencionales para el Estado de Coahuila” del Fondo Conacyt-Sener-Hidrocarburos. Este proyecto busca generar conocimiento en cuanto al aprovechamiento del gas Shale en México, minimizando incertidumbres. Se trabaja en el desarrollo de procesos y procedimientos óptimos para conseguir una explotación sustentable de este recurso, además de la formación de recursos humanos en la temática de hidrocarburos no convencionales.

En este sentido, para dar continuidad al proyecto desarrollado en esta tesis se plantea:

- Realizar algunas visitas a sitios de extracción del gas Shale, con la finalidad de observar un proceso real y adquirir conocimiento de las prácticas empleadas actualmente.
- Contactar con trabajadores encargados de sitios de extracción, de esta manera se podrían obtener datos detallados sobre varios insumos de manera más exacta, minimizando la necesidad de realizar extrapolaciones de datos.
- Ampliar el alcance de Análisis de Ciclo de Vida (ACV); considerando procesos posteriores y laterales a la extracción de gas Shale, con lo cual se pueden obtener datos sobre impactos ambientales de todo su ciclo de vida, desde la cuna hasta la tumba.
- Hacer análisis diferentes en conjunto con un ACV; es necesario considerar algunos aspectos como el ámbito económico de un proceso de extracción de gas Shale, con lo cual se pueden estimar costos y ganancias en este tipo de procesos, además de gastos e impactos ambientales.

Atendiendo lo mencionado, se puede dar seguimiento al trabajo realizado, complementando algunas actividades y dando una aproximación más realista sobre los procesos involucrados antes, durante y posteriores a la extracción del gas Shale.

9. Referencias

- [1] M. Meratizaman, S. Monadizadeh, O. Pourali, M. Amidpour. High efficient-low emission power production from low BTU gas extracted from heavy fuel oil gasification, introduction of IGCC-SOFC process. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 23 (2015) 1-15.
- [2] N. Abas, A. Kalair, N. Khan. Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures.* 69 (2015) 31-49.
- [3] J.C. Li, B. Gong, H.G. Wang. Mixed integer simulation optimization for optimal hydraulic fracturing and production of shale gas fields. *Engineering Optimization.* 48 (2015) 1378-1400.
- [4] B. Ali, A. Kumar. Development of life cycle water footprints for gas-fired power generation technologies. *Energ. Convers. Manage.* 110 (2016) 386-396.
- [5] J. Gao, F. You. Shale gas supply chain design and operations toward better economic and life cycle environmental performance: MINLP Model and global optimization algorithm. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 3 (2015) 1282-1291.
- [6] T.V. Bartholomew, M.S. Mauter. Multiobjective optimization model for minimizing cost and environmental impact in Shale gas water and wastewater management. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4 (2016) 3728-3735.
- [7] S. Bilgen, İ. Sarıkaya. New horizon in energy: Shale gas. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 35 (2016) 637-645.
- [8] I. de Melo-Martin, J. Hays, M.L. Finkel. The role of ethics in Shale gas policies. *Sci. Total Environ.* 470-471 (2014) 1114-1119.
- [9] N. Ziogiannis, J. Alcorn, J. Rupp, S. Carley, J.D. Graham. State regulation of unconventional gas development in the U.S.: An empirical evaluation. *ERSS.* 11 (2016) 142-154.
- [10] E. Lichtenthaler. Technological change and the technology intelligence process: a case study. *J. Eng. Technol. Manage.* 21 (2004) 331-348.
- [11] H. Taskin, M. Adali. Technological intelligence and competitive strategies: an application study with fuzzy logic. *J. Intell. Manuf.* 15 (2004) 417-429.

- [12] O. Castellanos, D.C. Ramírez, V.M. Montañez. Perspectiva en el desarrollo de las enzimas industriales a partir de la inteligencia tecnológica. *Rev. Ing. Inv.* 26(2) (2006) 52-67.
- [13] E. Institute. *A Guide to Shale Gas.* 1 (2015).
- [14] U.S. Energy & Information Administration. Recuperado de: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=110>.
- [15] G.O. Canada. *Exploration and production of Shale and tight resources.* 2016 2016-08-23 (cited 2017). Recuperado de: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/sources/shale-tight-resources/17677>.
- [16] Q. Meng. The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm. *Sci. Total Environ.* 580 (2017) 953-957.
- [17] N.H.F.C. Registry. *Hydraulic fracturing: The process.* 2018; Recuperado de: <https://fracfocus.org/hydraulic-fracturing-how-it-works/hydraulic-fracturing-process>.
- [18] T. Stephenson, J.E. Valle, X. Riera-Palou. Modeling the relative GHG emissions of conventional and Shale gas production. *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011) 10757-10764.
- [19] N.H.F.C. Registry. *What chemicals are used.* 2018; Recuperado de: <https://fracfocus.org/chemical-use/what-chemicals-are-used>.
- [20] M. Shah, S. Shah, A. Sircar. A comprehensive overview on recent developments in refracturing technique for Shale gas reservoirs. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 46 (2017) 350-364.
- [21] W.V.S.O.R. Organization. *Upshur Marcellus Shale drilling site, before, during and after drilling.* 2009; Recuperado de: <https://wvsoro.org/upshur-county-marcellus-shale-drilling-site-drilling>.
- [22] E. Masanet, Y. Chang, A.R. Gopal, P. Larsen, W.R. Morrow, R. Sathre, A. Shehabi, P. Zhai. Life-Cycle Assessment of electric power systems. *Annu. Rev. Env. Resour.* 38 (2013) 107-136.
- [23] A. Saussay. Can the US shale revolution be duplicated in continental Europe? An economic analysis of European shale gas resources. *Energ. Econ.* 69 (2018) 295-306.

- [24] W.J. Lee, S.Y. Sohn. Patent analysis to identify shale gas development in China and the United States. *Energ. Policy.* 74 (2014) 111-115.
- [25] C. Zou, Y. Ni, J. Li, A. Kondash, R. Coyte, N. Lauer, H. Cui, F. Liao, A. Vengosh. The water footprint of hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. *Sci Total Environ.* 630 (2018) 349-356.
- [26] D. Dong, Y. Wang, X. Li, C. Zou, Q. Guan, C. Zhang, J. Huang, S. Wang, H. Wang, H. Liu, W. Bai, F. Liang, W. Lin, Q. Zhao, D. Liu, Z. Qiu. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China. *Natural Gas Industry B.* 3 (2016) 12-26.
- [27] M. Guo, Y. Xu, Y.D. Chen. Catching environmental noncompliance in shale gas development in China and the United States. *Resour. Conserv. Recycl.* 121 (2017) 73-81.
- [28] P.B. Whyman. The local economic impact of shale gas extraction. *Regional Studies.* 52 (2017) 184-196.
- [29] S. Jiang, J. Zhang, Z. Jiang, Z. Xu, D. Cai, L. Chen, Y. Wu, D. Zhou, Z. Jiang, X. Zhao, S. Bao. Geology, resource potentials, and properties of emerging and potential China shale gas and shale oil plays. *Interpretation.* 3 (2015) SJ1-SJ13.
- [30] I. Vandecasteele, I. Mari Rivero, S. Sala, C. Baranzelli, R. Barranco, O. Batelaan, C. Lavalle. Impact of Shale gas development on water resources: a case study in northern poland. *Environ. Manage.* 55 (2015) 1285-1299.
- [31] M.P. Annevelink, J.A. Meesters, A.J. Hendriks. Environmental contamination due to shale gas development. *Sci. Total Environ.* 550 (2016) 431-438.
- [32] C. Davis. Fracking and environmental protection: An analysis of U.S. state policies. *Extr. Ind. Soc.* 4 (2017) 63-68.
- [33] D. Evensen, R. Stedman. Beliefs about impacts matter little for attitudes on shale gas development. *Energ. Policy.* 109 (2017) 10-21.
- [34] C.W. Moore, B. Zielinska, G. Petron, R.B. Jackson. Air impacts of increased natural gas acquisition, processing, and use: a critical review. *Environ. Sci. Technol.* 48 (2014) 8349-8359.
- [35] B.K. Sovacool. Cornucopia or curse? Reviewing the costs and benefits of shale gas hydraulic fracturing (fracking). *Renew. Sust. Energ. Rev.* 37 (2014) 249-264.

- [36] J.L. Adgate, B.D. Goldstein, L.M. Mckenzie. Potential public health hazards, exposures and health effects from unconventional natural gas development. *Environ. Sci. Technol.* 48 (2014) 8307-8320.
- [37] A. Mazur. How did the fracking controversy emerge in the period 2010-2012? *Public Underst. Sci.* 25 (2016) 207-222.
- [38] D. Evensen, R. Stedman. 'Fracking': Promoter and destroyer of 'the good life'. *J. Rural Stud.* 59 (2018) 142-152.
- [39] A. Mayer. Risk and benefits in a fracking boom: Evidence from Colorado. *Extr. Ind. Soc.* 3 (2016) 744-753.
- [40] D.L. Pinti, Y. Gelinas, A.M. Moritz, M. Larocque, Y. Sano. Anthropogenic and natural methane emissions from a shale gas exploration area of Quebec, Canada. *Sci. Total Environ.* 566-567 (2016) 1329-1338.
- [41] K.J. Brasier, K. Jalbert, A.J. Kinchy, S.L. Brantley, C. Unroe. Barriers to sharing water quality data: experiences from the Shale Network. *J. Environ. Plann. Man.* 60 (2017) 2103-2121.
- [42] D.J. Lampe, J.F. Stolz. Current perspectives on unconventional shale gas extraction in the Appalachian Basin. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 50 (2015) 434-446.
- [43] M.C. Mclaughlin, T. Borch, J. Blotevogel. Spills of hydraulic fracturing chemicals on agricultural topsoil: biodegradation, sorption, and co-contaminant interactions. *Environ. Sci. Technol.* 50 (2016) 6071-6078.
- [44] J.H. Son, A. Hanif, A. Dhanasekar, K.H. Carlson. Colorado Water Watch: real-time groundwater monitoring for possible contamination from oil and gas activities. *Environ. Monit. Assess.* 190 (2018) 138.
- [45] A. Vengosh, R.B. Jackson, N. Warner, T.H. Darrah, A. Kondash. A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 48 (2014) 8334-8348.
- [46] J.P. Nicot, B.R. Scanlon. Water use for Shale-gas production in Texas, U.S. *Environ. Sci. Technol.* 46 (2012) 3580-3586.

- [47] Y. Chang, R. Huang, E. Masanet. The energy, water, and air pollution implications of tapping China's Shale gas reserves. *Resour. Conserv. Recycl.* 91 (2014) 100-108.
- [48] J. Kim, J. Kim, S. Hong. Recovery of water and minerals from shale gas produced water by membrane distillation crystallization. *Water Res.* 129 (2018) 447-459.
- [49] B.D. Lutz, A.N. Lewis, M.W. Doyle. Generation, transport, and disposal of wastewater associated with Marcellus Shale gas development. *Water Resour. Res.* 49 (2013) 647-656.
- [50] D.L. Shaffer, L.H. Arias Chavez, M. Ben-Sasson, S. Romero-Vargas Castrillon, N.Y. Yip, M. Elimelech. Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: drivers, technologies, and future directions. *Environ Sci Technol.* 47 (2013) 9569-9583.
- [51] B. Akyon. Biological treatment of hydraulic fracturing produced water. 2017, University of Pittsburgh. PhD. Thesis.
- [52] J. Gao, F. You. Design and optimization of shale gas energy systems: Overview, research challenges, and future directions. *Comput. Chem. Eng.* 106 (2017) 699-718.
- [53] K.M. Davis, M.N. Nguyen, M.R. McClung, M.D. Moran. A Comparison of the impacts of wind energy and unconventional gas development on land-use and ecosystem services: an example from the Anadarko Basin of Oklahoma, USA. *Environ. Manage.* 61:5 (2018) 796-804.
- [54] A. Burnham, J. Han, C.E. Clark, M. Wang, J.B. Dunn, I. Palou-Rivera. Life-cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum. *Environ Sci Technol.* 46 (2012) 619-627.
- [55] A. Striolo, D.R. Cole. Understanding Shale gas: recent progress and remaining challenges. *Energy & Fuels.* 31 (2017) 10300-10310.
- [56] R. Weijermars, N. Sorek, D. Sen, W.B. Ayers. Eagle Ford Shale play economics: U.S. versus Mexico. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 38 (2017) 345-372.
- [57] C.A. Morales Velasco. Assessment of the Mexican Eagle Ford Shale oil and gas resources. 2013. Texas A&M University. MSc. Thesis.
- [58] X. Gong. Assessment of Eagle Ford shale oil and gas resources. 2013. Texas A&M University. PhD. Thesis

- [59] A. de la Vega Navarro, J.R. Villegas. El gas de lutitas (Shale Gas) en México. Recursos, explotación, usos, impactos. *Economía UNAM*. 12 (2015) 79-105.
- [60] B. Mota, M.I. Gomes, A. Carvalho, A.P. Barbosa-Povoa. Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *J. Clean Prod.* 105 (2015) 14-27.
- [61] A.J. Calderón, O.J. Guerra, L.G. Papageorgiou, J.J. Siirola, G.V. Reklaitis. Preliminary evaluation of Shale gas reservoirs: appraisal of different well-pad designs via performance metrics. *Ind. Eng. Chem. Res.* 54 (2015) 10334-10349.
- [62] F. You, L. Tao, D.J. Graziano, S.W. Snyder. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE Journal*. 58 (2012) 1157-1180.
- [63] B. Wang, B.H. Gebreslassie, F. You. Sustainable design and synthesis of hydrocarbon biorefinery via gasification pathway: Integrated life cycle assessment and techno-economic analysis with multiobjective superstructure optimization. *Comput. Chem. Eng.* 52 (2013) 55-76.
- [64] ISO 14040. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, International Organisation for Standardisation (ISO). (2006) Geneva.
- [65] M.A. Curran. Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products. 2012: John Wiley & Sons.
- [66] J. Gao, F. You. Economic and environmental life cycle optimization of noncooperative supply chains and product systems: modeling framework, mixed-integer bilevel fractional programming algorithm, and Shale gas application. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5 (2017) 3362-3381.
- [67] ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, International Organisation for Standardisation (ISO). (2006) Geneva.
- [68] K.A. Ibrahim Menoufi. Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art. 2011. Universitat de Lleida. MsC. Thesis.
- [69] J.C. Bare, P. Hofstetter, D.W. Pennington, H de Haes. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. *Int J LCA*. 5 (2000) 319-326.

- [70] C. He F. You. Deciphering the true life cycle environmental impacts and costs of the mega-scale shale gas-to-olefins projects in the United States. *Energ. Environ. Sci.* 9 (2016) 820-840.
- [71] C.L. Weber, C. Clavin. Life cycle carbon footprint of shale gas: review of evidence and implications. *Environ. Sci. Technol.* 46 (2012) 5688-5695.
- [72] G.A. Heath, P. O'donoghue, D.J. Arent, M. Bazilian. Harmonization of initial estimates of shale gas life cycle greenhouse gas emissions for electric power generation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 111 (2014) E3167-3176.
- [73] W. Liu, A. Ramirez. State of the art review of the environmental assessment and risks of underground geo-energy resources exploitation. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 76 (2017) 628–644.
- [74] M. Jiang, W. M. Griffin, Ch. Hendrickson, P. Jaramillo, J. VanBriesen, A. Venkatesh. Life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas. *Environ. Res. Lett.* (2011) 6:034014.
- [75] H.J. ben Jaballah, F. ben Ammar. Life Cycle Assessment impact of fracking shale gas in Tunisia. 6th International Renewable Energy Congress, 2015.
- [76] C. Tagliaferri, R. Clift, P. Lettieri, C. Chapman. Shale gas: a life-cycle perspective for UK production. *Int. J. Life Cycle Assess.* (2017) 22:919–937.
- [77] J. Wang, M. Liu, B.C. Mclellan, X. Tang, L. Feng. Environmental impacts of shale gas development in China: A hybrid life cycle analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 120 (2017) 38-45.
- [78] C.R. Seelke, M. Ratner, M.A. Villarreal, P. Brown, Mexico's oil and gas sector: background, reform efforts, and implications for the United States. 2013: Congressional Research Service.
- [79] M.R. Monteiro, C.L. Kugelmeier, R.S. Pinheiro, M.O. Batalha, A. Da Silva César. Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 88 (2018) 109-122.
- [80] C. Tagliaferri, P. Lettieri, C. Chapman. Life Cycle Assessment of Shale gas in the UK. *Energy Procedia.* 75 (2015) 2706-2712.

- [81] K.B. Gregory, R.D. Vidic, D.A. Dzombak. Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fractury. *Elements*. 7 (2011) 181-186.