



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Identificación de impactos ambientales potenciales
sobre la oferta de servicios ecosistémicos por
proyectos de fracturación hidráulica en el contexto
de ecosistemas de humedales**

Autor(es)
Manuela Arango Figueroa

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020



**Identificación de impactos ambientales potenciales sobre la oferta de servicios
ecosistémicos por proyectos de fracturación hidráulica en el contexto de ecosistemas de
humedales**

Manuela Arango Figueroa

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Asesores (a):
Lina Maria Berrouet Cadavid
Ingeniera Forestal, PhD

Línea de Investigación:
Sistemas Socioecológicos, Gestión Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2020.

Identificación de impactos ambientales potenciales sobre la oferta de servicios ecosistémicos por proyectos de fracturación hidráulica en el contexto de ecosistemas de humedales

Resumen

Desde la invención de la máquina de vapor durante la revolución industrial, el ser humano ha dependido de los combustibles fósiles para desarrollar muchas de sus actividades. Esto se agudizó con la invención del motor de combustión interna y con la producción en masa de vehículos, lo que hizo que cada vez más la economía mundial dependiera de la extracción de estos materiales, especialmente petróleo. Sin embargo, el petróleo y sus derivados son recursos naturales no renovables y por ende sus reservas son finitas por lo que para extenderlas se ha recurrido a diferentes técnicas como es el caso de la fracturación hidráulica “*Fracking*”, la cual como cualquier actividad antrópica tiene impactos ambientales. No obstante, esta actividad nunca se ha dado en el país por lo que aún no se han definido oficialmente los términos de referencia para las evaluaciones de impacto ambiental de los proyectos de fracking. Por esta razón, dentro de este trabajo se identificaron los impactos ambientales más relevantes de la fracturación hidráulica en el contexto de los ecosistemas de humedal a través de una revisión de literatura, y se determinaron los aspectos que deberían incluirse dentro de los términos de referencia para esta actividad. Se encontró que los impactos que con más frecuencia se mencionaban dentro de los artículos revisados se relacionaban con alteraciones en la calidad del agua. Por el contrario, pocos artículos se enfocaron en los impactos sobre los factores sociales.

1. Introducción

Desde la invención de la máquina de vapor durante la revolución industrial, el ser humano ha dependido de los combustibles fósiles para desarrollar muchas de sus actividades. Esto se agudizó con la invención del motor de combustión interna y con la producción en masa de vehículos, lo que hizo que cada vez más la economía mundial dependiera de la extracción de estos materiales, especialmente petróleo. Uno de los principales motores de la economía a nivel mundial hoy en día es la industria de los hidrocarburos, de los cuales no sólo se obtiene un 80% de la energía a nivel mundial (World Energy Council, 2016), sino también materia prima para otros productos como el plástico, las naftas y el asfalto, los cuales tienen un amplio uso. Sin embargo, estos recursos son finitos y debido al aumento exponencial en su demanda, se ha visto la necesidad de buscar nuevas formas de extracción de los hidrocarburos que no sólo aumentaran la eficiencia de las técnicas utilizadas, sino que hicieran económicamente viable el aprovechamiento de reservas que antes no se habían explorado debido a su baja permeabilidad.

Una de estas técnicas es la fracturación hidráulica (*Fracking*), la cual aumenta la permeabilidad de las rocas realizando fracturas con ayuda de una mezcla de agua, arena y aditivos, aumentando así las reservas de petróleo y gas alrededor del mundo (Bertinat, D’Elía, Ochandio, Svampa, & Viale, 2014). Por ejemplo para el caso de Colombia se estima que con la implementación de esta técnica, se incrementarían las reservas en 23,7 años con la extracción de 7500 millones de barriles de petróleo en la cuenca del Magdalena Cauca además de las potenciales reservas de

gas en esta cuenca, en los llanos orientales y en la cuenca Cesar-Ranchería, lo que podría generar grandes beneficios económicos para el país **Figura 1**.

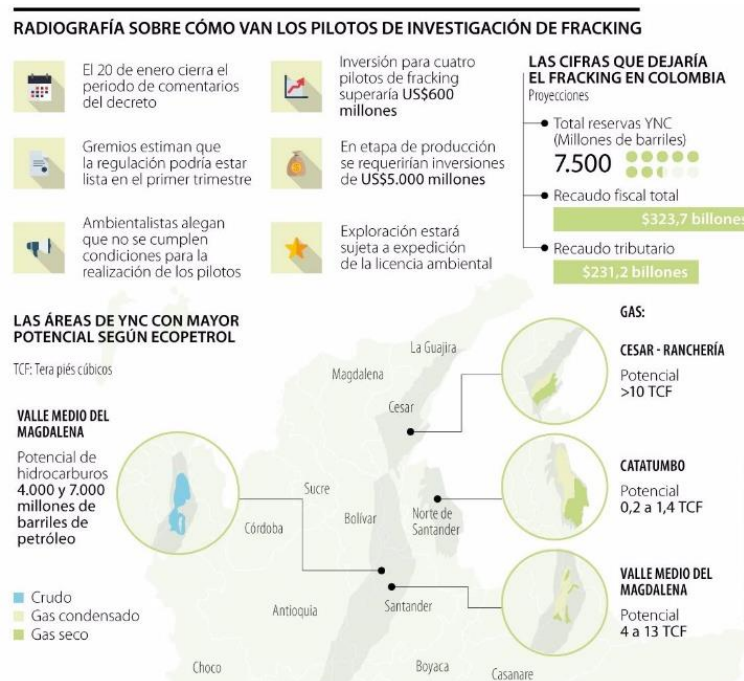


Figura 1. Panorama de la fracturación hidráulica en Colombia. Tomado de <https://www.larepublica.co/economia/en-el-primer-trimestre-estarian-las-lineas-base-para-desarrollar-pilotos-de-fracking-2952895>

Sin embargo, como toda actividad antrópica, este proceso genera impactos ambientales, los cuales modifican la calidad de vida a través de la transformación de servicios ecosistémicos. Debido a esto, en varias regiones del mundo esta práctica fue prohibida¹. Además, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha recomendado a varios de sus estados miembros detener esta actividad debido a las implicaciones para el cambio climático (Semana Sostenible, 2018). No obstante, aunque en Colombia el Fracking está prohibido, en la actualidad varios sectores de la sociedad se encuentran debatiendo los posibles lineamientos para la implementación de proyectos piloto de fracturación hidráulica en el Magdalena Medio con el fin de evaluar los posibles impactos ambientales (Semana Sostenible, 2019).

No obstante, en esta zona del país se encuentra una extensión de 736 km² de ciénagas (IDEAM, 2019), las cuales podrían sufrir alteraciones en sus propiedades biofísicas y su integridad ecológica lo que a su vez podría modificar sus funciones ecosistémicas y su capacidad para brindar servicios ecosistémicos, por lo que es necesario evaluar la viabilidad de estos proyectos en la zona teniendo en cuenta entre otros aspectos, la integridad ecológica de estos ecosistemas y como se relacionan con el bienestar de las comunidades a través de los servicios ecosistémicos. Un primer paso es identificar las acciones del proyecto, los impactos que éstas

¹ En Francia y Escocia se prohibió la implementación del Fracking en todo el territorio debido a los efectos que esta actividad puede tener sobre la calidad físicoquímica del agua. Adicionalmente se tienen prohibiciones locales en los estados de Nueva York y Maryland, y en la cuenca del río Delaware (Estados Unidos), en los estados de Victoria y West Australia (Australia), en el estado de Paraná (Brasil), en la provincia de Entre Ríos (Argentina) y en la región Castilla-La Mancha (España); debido a los riesgos de sismicidad, las afectaciones en la calidad y la cantidad de agua para diferentes usos, y a posibles efectos sobre la salud

generan y cuales funciones y servicios ecosistémicos se ven impactados por la actividad. En este sentido, en este trabajo se realizó una identificación de impactos ambientales de los proyectos de fracturación hidráulica, las acciones que causan cada impacto y los componentes del ambiente que se ven afectados a través de una revisión sistemática de literatura. Además, se identificaron los aspectos más relevantes para la evaluación de los impactos ambientales. Dentro de estos términos de referencia se destaca la importancia de entender el contexto social colombiano y como el conflicto armado crea nuevas dinámicas como es el caso de los procesos de restitución de tierras y los derrames de petróleo a causa de atentados de grupos parainstitucionales. Además, en vista del desconocimiento de gran parte de los acuíferos del país y su comportamiento, y de cómo la fracturación hidráulica puede impactarlos, es importante realizar estudios hidrogeológicos en los lugares donde se tiene proyectado implementar esta técnica. Finalmente, es fundamental conocer la fauna local y como interactúa con su hábitat para que las medidas de mitigación de la fragmentación que se diseñen sean más eficientes, en especial aquellas diseñadas para reducir los efectos de la fragmentación de ecosistemas acuáticos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Identificar impactos ambientales potenciales producidos sobre la oferta de servicios ecosistémicos de ecosistemas de humedal, debido a la ejecución de proyectos de extracción de hidrocarburos empleando la técnica de fracturación hidráulica (“Fracking”), y determinar los aspectos más relevantes a tener en cuenta en los términos de referencia para los estudios de impacto ambiental de proyectos de fracturación hidráulica.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar las actividades asociadas a la fracturación hidráulica y su correspondiente demanda de recursos naturales.
- Identificar las posibles transformaciones en la oferta potencial de servicios ecosistémicos prestados por un ecosistema de humedal debido a los impactos potenciales de estas actividades.
- Identificar los aspectos relevantes a tener en cuenta en los términos de referencia para los estudios de impacto ambiental de proyectos de fracturación hidráulica

3. Marco Teórico

3.1. La gestión ambiental en proyectos de desarrollo

Un impacto ambiental es la modificación producida por un proceso productivo, de consumo o proyecto de desarrollo sobre los factores ambientales (que comprende la integración de los componentes naturales y sociales) . El objetivo de la gestión ambiental es identificar, evaluar y manejar estos impactos a través de medidas preventivas, de mitigación, correctivas, compensatorias y potenciativas (Angel, Carmona, & Villegas, 2010). Para ello se sigue la secuencia mostrada en la *Figura 2*



Figura 2. Secuencia lógica de la gestión ambiental en Angel et al., (2010)

Primero se hace un diagnóstico de la calidad ambiental de la zona antes de la inserción del proyecto. Posteriormente se evalúan las transformaciones que puede sufrir el ambiente a causa del proyecto. Estos estudios son prospectivos, es decir, se hacen antes de la ejecución de la actividad, y para su elaboración se utilizan diferentes tipos de herramientas como modelos de análisis por dimensiones. Para facilitar su realización, *el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* ha desarrollado términos de referencia para los diferentes tipos de proyectos que se realizan en el país. En el momento de permitir la inserción de nuevos proyectos, es importante determinar los aspectos a evaluar dentro de éstos ya que de la calidad de los términos de referencia dependerá la calidad de los estudios de impacto ambiental. Finalmente se elaboran planes de manejo ambiental y se determinan los costos que tendrá la implementación de estas medidas de manejo. A la fecha no hay términos de referencia oficiales para la realización de estudios de impacto ambiental en proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos por fracturación hidráulica, sin embargo en *artículo 2.2.1.1.A.2.9 del decreto 328 de 2020* se faculta al *Servicio Geológico Colombiano, Instituto Alexander Von Humboldt, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio del Interior y al Ministerio de Salud y Protección Social* dentro del marco de sus competencias a definir las variables de monitoreo, además, en el *artículo 2.2.1.1.A.2.3* se determina la obligatoriedad de la Licencia Ambiental para este tipo de proyectos.

3.2. Los proyectos de extracción de petróleo y gas por fracturación hidráulica.

La fracturación hidráulica “*Fracking*”, es el proceso de estimulación del petróleo y el gas de reservorios poco permeables mediante la inyección de una mezcla acuosa de sustancias químicas conocida como “*fluido fracturante*” (Figura 3), lo que mejora la porosidad y permeabilidad de las rocas, permitiendo así extraer combustibles de formaciones previamente inaccesibles (Maloney et al., 2018; Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017).

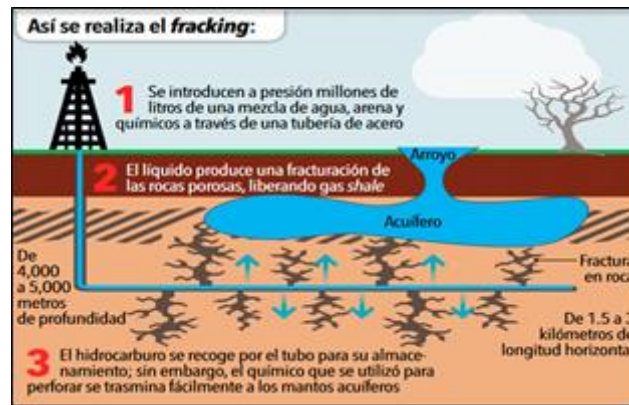


Figura 3. Proceso de fracturación hidráulica. Tomado de: Abrego, M (2017). Fracking, sin freno para contaminar. El Horizonte. Recuperado de: <http://www.elhorizonte.mx/local/fracking-sin-freno-para-contaminar/1962094>.

Esta técnica ha sido masivamente utilizada en la última década gracias al incremento de la demanda del gas natural y al descubrimiento de nuevos reservorios alrededor del mundo (

Figura 4), de los cuales el 40% corresponde a fuentes no convencionales. Adicionalmente, este tipo de procesos ha derivado en la generación de empleos en zonas rurales debido a su demanda de mano de obra no calificada, lo que dinamiza la economía en los territorios, sin embargo, estos empleos están concentrados en sectores económicos específicos (construcción, alojamientos, alimentación, minería y manufactura), lo que puede generar escasez de mano de obra para otros sectores, particularmente el sector agropecuario (Burton et al., 2014; Chen et al., 2017; Measham & Fleming, 2014; Shrestha et al., 2017).



Figura 4. Reservas potenciales de gas alrededor del mundo en Burton et al. (2014)

En Colombia hay actualmente 48 bloques de hidrocarburos no convencionales en las regiones del Magdalena Medio y de la Cordillera Oriental (*Figura 5*), de los cuales 11 se encuentran activos en exploración, uno se encuentra en producción², y un bloque se encuentra en reserva (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2018)

² Los bloques en exploración están a cargo de las empresas Ecopetrol, ExxonMobil, Pares Recursos, CNE-Oil, ConocoPhillips y Drummond y el bloque en producción está a cargo de la empresa Drummond.

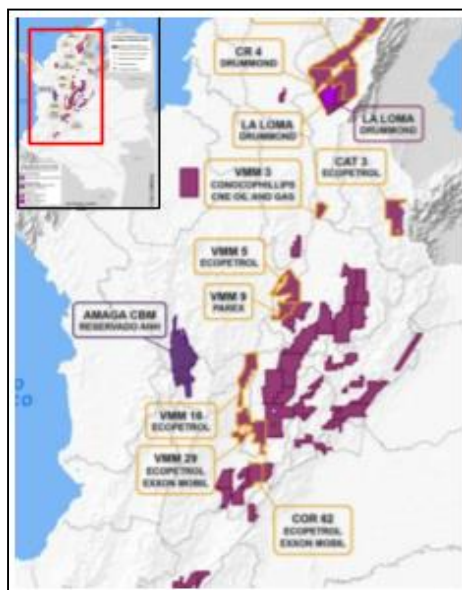


Figura 5. Mapa de los bloques disponibles, activos (exploración y explotación) y en reserva para la extracción de hidrocarburos no convencionales (Fracking). Ver <https://colombiaplural.com/la-frontera-del-fracking-avanza-territorios-indigenas/> para información adicional sobre las convenciones

Sin embargo, a pesar de esta actividad ha sido ampliamente estudiada, con más de mil artículos evaluados por pares, hay pocos estudios que analizan los efectos biológicos de esta actividad, y los que existen se enfocan en especies o regiones biogeográficas específicas (Souther et al., 2014). Adicionalmente, las mezclas exactas de químicos usados en la fracturación hidráulica no son divulgadas por ser “*secretos comerciales*”, por lo que su publicación es voluntaria y los operadores no revelan la lista de químicos usados en su totalidad. Adicionalmente, de las 1,021 sustancias identificadas, sólo se cuenta con información de los efectos en la reproducción y el desarrollo sobre qué de 240 químicos (24%), y de estos 240, 126 sustancias cuentan con datos sobre toxicidad reproductiva y 192 sobre efectos adversos en el desarrollo, adicionalmente, esta información está en su mayoría basada en toxicidad en animales, por lo que se desconocen los efectos que la presencia de estos químicos en agua para consumo humano pueda tener en la salud de las personas (Elliott, Ettinger, Leaderer, Bracken, & Deziel, 2017).

The Endocrine Disruption Exchange realizó un estudio con los 944 productos más usados en las operaciones de fracturación hidráulica, identificando su composición y analizando la información toxicológica de los 622 químicos identificados dentro de éstos. Con esta información se evaluaron los riesgos a la salud humana que presentan estos químicos. Se determinó que el 75% de éstos pueden producir efectos en el sistema respiratorio, en el sistema digestivo, los ojos y la piel. Además, entre el 40 y 50% afectan los sistemas nervioso, circulatorio, inmunológico y renal. Asimismo, el 25% de estas sustancias son o pueden ser cancerígenos. Igualmente, 37% de ellos tienen efectos potenciales en el sistema endocrino (Burton et al., 2014).

Otra de las preocupaciones es sobre las implicaciones que tiene el intensivo uso del agua que tiene la fracturación hidráulica en la seguridad hídrica de la población, especialmente donde por las condiciones climáticas ya existe un estrés hídrico considerable. La fracturación hidráulica usa entre 1.5 y 10 millones de litros de agua por pozo, y entre 9.17 y 11.11 millones de litros por hectárea; y aunque esta demanda de recursos puede parecer despreciable comparada con el uso del agua para actividades como la agricultura, la ganadería, o la

generación de energía termoeléctrica, esta actividad se viene dando en zonas aledañas a comunidades con uso agrícola donde ya existen captaciones de agua para otros usos (por ejemplo uso doméstico o agropecuario) como se evidencia en Queensland por (Phelan & Jacobs, 2016) y en las regiones dentro de la formación de esquistos Marcellus, USA por (Filteau, 2011), lo que genera no sólo conflictos de usos del suelo, sino que puede producir escasez de agua por acumulación de impactos; además, dependiendo de las características de las fuentes de captación, pequeños caudales pueden traducirse en estrés hídrico para estos reservorios (McLaughlin, Borch, & Blotevogel, 2016; Measham & Fleming, 2014; Shrestha et al., 2017; Tiedeman, Yeh, Scanlon, Teter, & Mishra, 2016; Zou et al., 2018).

Asimismo, sus posibles efectos en la calidad del agua para consumo humano preocupan a la población, por ejemplo, este tipo de actividad genera aguas residuales con alta salinidad y con altas concentraciones de sólidos disueltos (350 g/L)(Shrestha et al., 2017). Además, en cada pozo, se generan grandes cantidades de aguas residuales, por ejemplo en la formación Marcellus en Pensilvania (PA), se produjeron cerca de 5.2 millones de Litros de aguas residuales por pozo en los primeros cuatro años de operación. En 2013 se generaron 5,810 millones de litros de aguas residuales producto del fracking en PA. De estos, 550 millones de litros fueron inyectados en el suelo en pozos de disposición y 430 millones de litros fueron descargadas a cuerpos de agua superficiales luego de ser tratados, sin embargo, estos tratamientos se enfocan en remover DQO, SST, nutrientes, grasas, aceites y algunos metales como hierro y bario, por lo que son inadecuados para este tipo de aguas residuales que tienen altos contenidos de trihalometanos y de bencenos (Getzinger et al., 2015).

3.3. Oferta potencial de servicios ecosistémicos

En los últimos 50 años, los ecosistemas alrededor del mundo han sufrido cambios en su estructura y composición, a causa de las acciones humanas (Chapin et al., 2010), lo que tiene implicaciones en las funciones ecosistémicas y en su capacidad de mantener la provisión de servicios ecosistémicos de importancia para el bienestar humano (Fisher, Turner, & Morling, 2009; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Como resultado de estos cambios, son cada vez más los estudios que intentan entender las retroalimentaciones ecosistema-sociedad mediante el enfoque de los sistemas socioecológicos (Liu et al., 2007; Palmer et al., 2004). Un sistema socioecológico está determinado por la interacción entre el sistema social y el funcionamiento del ecosistema (Liu et al., 2007). Estas interacciones tienen una alta complejidad ya que las decisiones individuales y colectivas (i.e. cambios en el uso del suelo, quemadas controladas, urbanización) pueden traducirse en pulsos y presiones sobre los ecosistemas, las que a su vez pueden afectar el bienestar humano a través de modificaciones en los servicios ecosistémicos (Collins et al., 2011) como se muestra en la *Figura 6*.

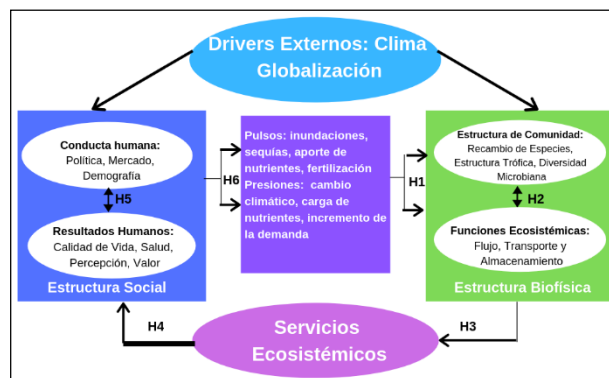


Figura 6. Marco Conceptual de los sistemas socioecológicos en Collins et al (2011) H1-H6 representan hipótesis para el estudio de los sistemas sociológicos. H1 representa como la estructura biofísica del ecosistema puede verse alterada por las dinámicas de pulsos y presiones, alterando a su vez las funciones ecosistémicas (H2) lo que se traduce en transformaciones en los servicios ecosistémicos (H3) y en la calidad de vida la percepción de bienestar (H4), cambiando la conducta humana (H5), lo que produce alteraciones

Los servicios ecosistémicos son las condiciones o procesos de los ecosistemas que son utilizados directa o indirectamente para generar bienestar. Estos servicios se pueden clasificar según el tipo de beneficio que se obtienen de ellos en servicios : de aprovisionamiento, culturales y de regulación; o según el tipo de flujo (Figura 7) desde la fuente hasta el beneficiario: in situ [1], omnidireccional [2], unidireccional [3] o de sumidero/barrera [4] (Fisher, Turner, & Morling, 2009).

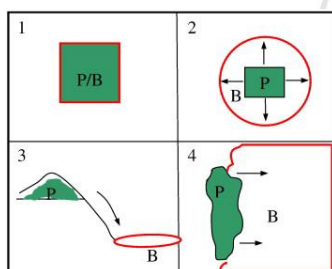


Figura 7. Clasificación de los servicios ecosistémicos en Fisher et al (2009)

La provisión de los servicios ecosistémicos depende de funciones ecosistémicas como los ciclos biogeoquímicos, la disponibilidad de hábitat para especies de fauna y flora, y la fotosíntesis (de Groot, 1992). En la Tabla 1 se presentan algunas definiciones relevantes para el estudio de los servicios ecosistémicos según Burkhard, Kroll, Nedkov, & Müller, (2012). En dicha tabla, se resalta la definición de oferta potencial de servicios ecosistémicos (OPSE), dado a que constituye un concepto central en el presente trabajo de investigación. La OPSE, de acuerdo con esto autores se entiende como “El máximo hipotético de servicios ecosistémicos que pueden ser proveídos por un ecosistema en su estado óptimo”. Esta oferta depende de flujos de materia y energía, y del estado de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas (Deal et al., 2017). Esta oferta puede verse afectada por las modificaciones sobre las propiedades biofísicas de los ecosistemas por la inserción de un proyecto de desarrollo o por dinámicas de pulsos y presiones que ocurren tanto naturalmente (i.e. inundaciones, sequías) como por acción del hombre (i.e. cambios en el uso del suelo, uso de fertilizantes, aumento en la demanda de recursos naturales por parte de la industria).

Tabla 1. Conceptos relevantes para el estudio de la oferta potencial de servicios ecosistémicos

Concepto	Definición
Oferta de servicios ecosistémicos	Capacidad que tiene un área en particular de proveer una gama de bienes y servicios ecosistémicos
Demanda de servicios ecosistémicos	Suma de los bienes y servicios de los ecosistemas que están siendo usados en un área en particular
Oferta potencial de servicios ecosistémicos	El máximo hipotético de servicios ecosistémicos que pueden ser proveídos por un ecosistema en su estado óptimo

3.4. Servicios ecosistémicos en humedales

Los humedales son ecosistemas que, debido a condiciones geomorfológicas e hidrológicas, permiten la acumulación de agua ya sea temporal o permanentemente, y dan a lugar a tipos de suelo y de organismos que se adaptan a las dinámicas particulares de los mismos (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015a). Estas dinámicas incluyen cambios estacionales en su hidrología y vegetación, lo que hace que sean especialmente sensibles a pulsos como inundaciones o sequías, y a presiones como cambios en los usos del suelo (Langan, Farmer, Rivington, & Smith, 2018). Estos ecosistemas brindan servicios como el almacenamiento de carbono, la mitigación de inundaciones, el almacenamiento de agua proveniente de la atmósfera y del subsuelo, y aprovisionamiento de peces y moluscos para alimento, y de agua para consumo humano, para uso agropecuario, entre otros, además de servicios culturales relacionados con el turismo y la generación de conocimiento científico.

En Colombia son considerados como ecosistemas estratégicos puesto que garantizan y mantienen el equilibrio de procesos ecológicos básicos (Akanni, Onwuteaka, Uwagbae, Mulwa, & Elegbede, 2017; Ibarra et al., 2014; Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2016; Kolka, Murdiyarsa, Kauffman, & Birdsey, 2016). Sin embargo, la inequidad social y la alta pobreza han llevado al uso de los humedales alrededor del trópico para diferentes usos como la acuicultura, la agricultura, la ganadería, entre otros (Davidson, 2014), lo que ha provocado que los humedales sean uno de los ecosistemas cuyas propiedades biofísicas (hidrología, vegetación, suelo), han sido más alteradas por el hombre (Carpenter, Stanley, & Vander Zanden, 2011). Para el caso de Colombia, debido a que sus condiciones son favorables para actividades como la agricultura y la ganadería, se estima que el 24% de los humedales están siendo utilizados para actividades antropogénicas (Figura 8), lo que altera su funcionalidad y por ende, su capacidad para brindar servicios ecosistémicos estratégicos (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2016).

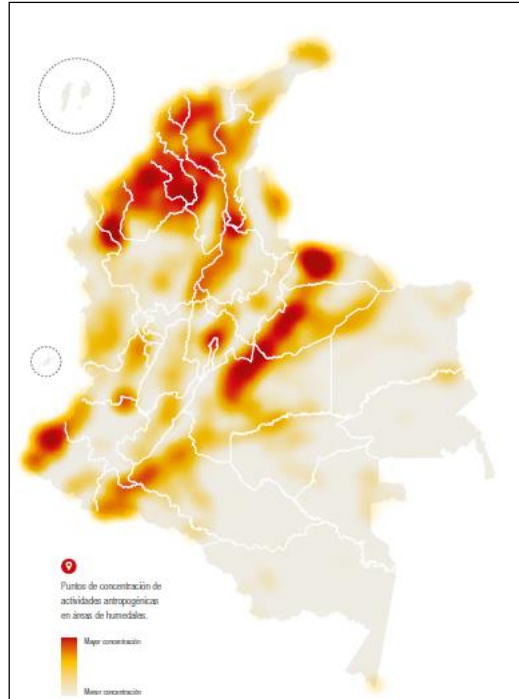


Figura 8. Concentración de la actividad antropogénica en los humedales continentales de Colombia. Tomado del Reporte de biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia, (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2016)

Además, con la posible implementación de la fracturación hidráulica en el Magdalena Medio y los llanos orientales, las cuales hacen parte de las regiones del Magdalena Cauca y el Orinoco con 5.701.101 ha y 14.725.346 ha respectivamente, haciéndolas dos de las regiones con mayor riqueza en humedales del país (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015c), generando nuevas presiones sobre estos ecosistemas, los cuales tienen un alto grado de degradación en el país como lo refleja el artículo publicado en la revista *Semana Sostenible* (*Semana Sostenible*, 2020). Además, como se observa en la *Figura 9* la mayoría de estos bloques se concentran sobre el Río Magdalena, el cual fue declarado sujeto de derechos en octubre de 2019.



Figura 9. Localización de los ecosistemas de humedal con respecto a potenciales lugares para la implementación de la fracturación hidráulica para extracción de petróleo y gas

4. Metodología

4.1. Identificación de impactos ambientales sobre los servicios ecosistémicos

En la **Figura 10** se presenta de manera resumida la metodología usada en la identificación de los impactos ambientales de la fracturación hidráulica.

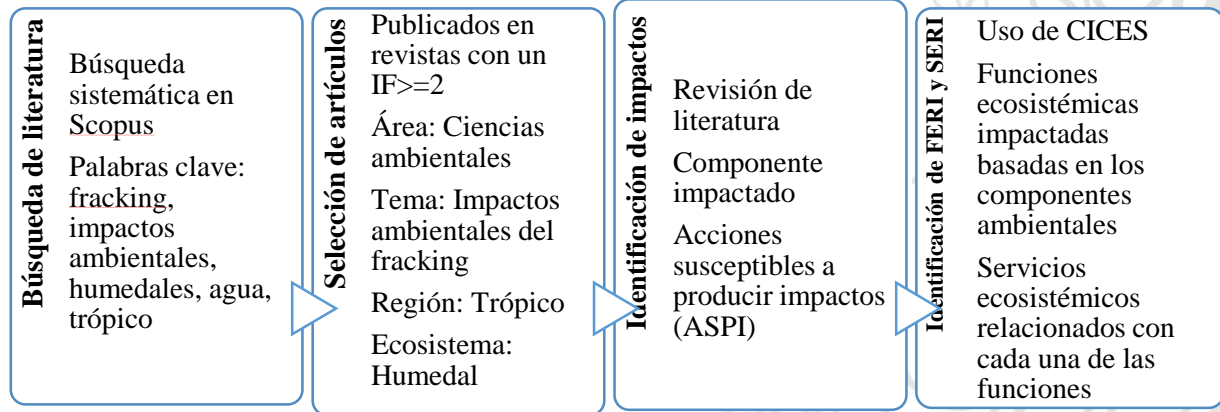


Figura 10. Metodología. ASPI (Acciones susceptibles a producir impacto), FERI (Funciones ecosistémicas susceptibles a recibir impacto), SERI (Servicios ecosistémicos susceptibles a revivir impacto)

Primero se identificaron los humedales que podrían verse afectados por la fracturación hidráulica usando sistemas de información geográfica y las capas disponibles en los geoportales gubernamentales (*Anexo 1*). Luego se realizó una búsqueda de literatura en Scopus® del tipo Título, Abstract, Palabras Clave utilizando la herramienta de búsqueda avanzada. Las ecuaciones de búsqueda usadas se registraron en una hoja de cálculo de Excel (*Anexo 2*) para tener un registro del número de resultados que cada una arrojó, discriminando estos resultados por año de publicación del artículo. Dentro de este tipo de búsqueda es posible que se tengan artículos que traten otros aspectos de la fracturación hidráulica (por ejemplo, factores que disminuyen la eficiencia) por lo que se revisó el resumen de cada resultado para determinar el tema central de cada artículo y se seleccionaron los artículos que tuvieran relación con el objetivo de investigación (i.e. explotación no convencional de hidrocarburos, y sus impactos sobre los servicios ecosistémicos de los humedales o sobre las propiedades fisicoquímicas del agua) publicados en revistas científicas con un factor de impacto mayor o igual a 2 para asegurar el rigor de los estudios seleccionados, y cuyo principal enfoque son las ciencias ambientales (*Anexo 3*) ya que las temáticas comprendidas dentro de esta categoría (

Figura 11) están relacionados con el objetivo de la investigación.

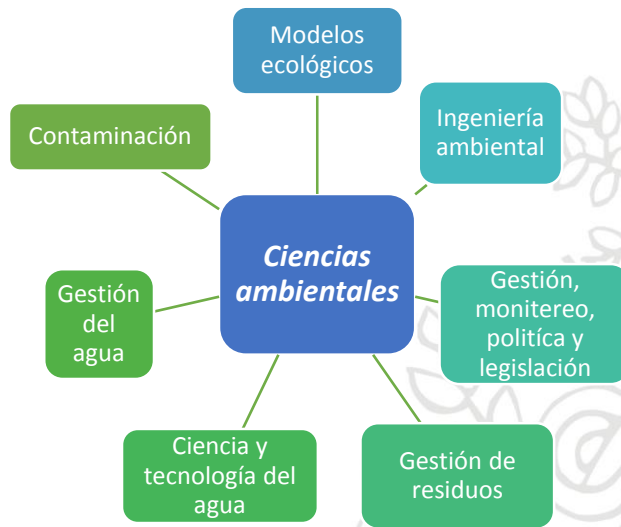


Figura 11. Temas comprendidos dentro de la categoría Ciencias ambientales de Scopus

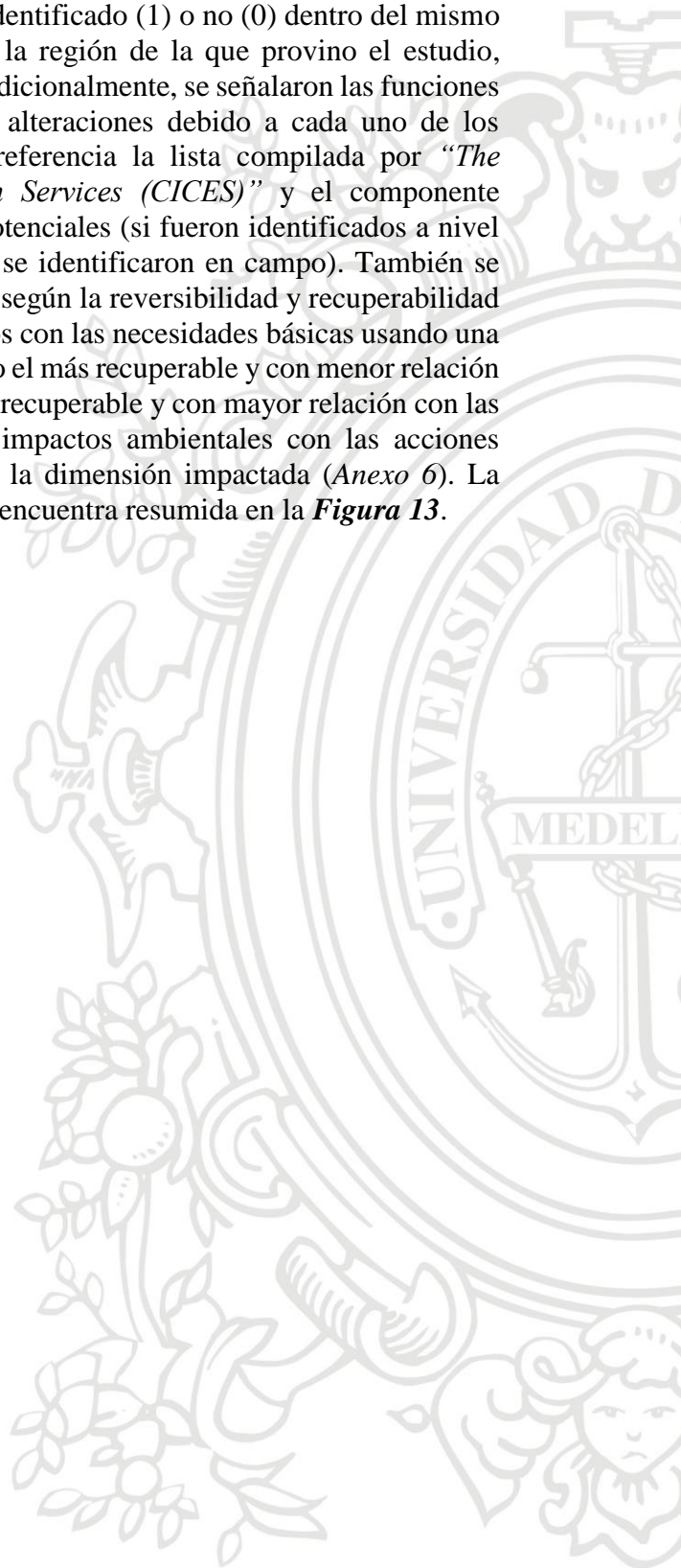
El tipo de búsqueda que se realizó tiene la ventaja de que los artículos son evaluados por pares lo que garantiza la transparencia de las publicaciones, sin embargo este tipo de restricción pudo dejar por fuera estudios que pueden brindar información valiosa (como tesis de pregrado o posgrado, o informes de entidades gubernamentales) debido a las limitaciones de tiempo y acceso a la información.

Los artículos consultados se clasificaron desde tres aspectos: momento de evaluación, tipo de ecosistema trabajado y enfoque operativo como se muestra en la *Figura 12*.

Momento de evaluación	Exante: Artículos predecesores a proyectos de fracturación hidráulica
	Expost: Casos de estudio en lugares donde ya existe la actividad
Enfoque	Teórico: Revisión de información toxicológica de los productos comúnmente usados en la actividad e inferencia de los impactos a partir de esta información
	Aplicado: Experimentos de modelación y análisis de laboratorio
Ecosistema	Bosque caducifolio
	Río
	Lago
	Sabana arbustiva
	No determinado

Figura 12. Clasificación de los artículos.

Por otro lado, se identificaron los impactos mencionados en los artículos revisados y se registraron en un archivo de Excel, indicando si fue identificado (1) o no (0) dentro del mismo (*Anexo 4*) citando el tipo de ecosistema afectado y la región de la que provino el estudio, agrupándolos en categorías para facilitar el análisis. Adicionalmente, se señalaron las funciones y los servicios ecosistémicos susceptibles a sufrir alteraciones debido a cada uno de los impactos ambientales (*Anexo 5*) utilizando como referencia la lista compilada por “*The Common International Classification of Ecosystem Services (CICES)*” y el componente ambiental impactado, clasificando los impactos en potenciales (si fueron identificados a nivel de laboratorio o por medio de modelos) y expos (si se identificaron en campo). También se categorizaron los servicios ecosistémicos impactados según la reversibilidad y recuperabilidad de los impactos, y la relación que tienen estos servicios con las necesidades básicas usando una escala de colores tipo semáforo (siendo el verde oscuro el más recuperable y con menor relación con las necesidades básicas, y el rojo oscuro el menor recuperable y con mayor relación con las necesidades básicas). Además, se relacionaron los impactos ambientales con las acciones susceptibles a producir cada uno de ellos y cuál es la dimensión impactada (*Anexo 6*). La información diligenciada en cada una de las tablas se encuentra resumida en la **Figura 13**.



Categorías de Impacto

Se da información sobre el artículo como los autores, el año de publicación, el ecosistema evaluado, y el país y la región dónde se encuentra le área de estudio. además, se identifica el momento de evaluación y el enfoque del artículo (ver Figura 11)

Los autores corresponden a las filas de la matriz y las categorías de impacto corresponden a las columnas

Si el impacto j fue identificado por el autor i , se llena la casilla ij con 1, de lo contrario se llena con 0

Servicios y funciones susceptibles a ser impactadas

Se da una breve descripción del impacto. Además, se da información sobre la dimensión y el componente impactado.

Se clasifican los impactos como Potenciales (si fueron identificados en laboratorio) o Expos (si los impactos fueron identificados en campo)

Se identifican las funciones ecosistémicas afectadas por cada impacto y los servicios asociados a cada función

Se categorizan los servicios dependiendo de la reversibilidad y recuperabilidad de los impactos y de la relación de los servicios con las necesidades básicas

Acciones del proyecto que pueden producir impactos

Se identifican las acciones del proyecto

Se identifican los impactos que cada acción puede provocar y la dimensión que se ve impactada por cada uno de ellos

Figura 13. Información que se diligenció en cada anexo

5 Resultados y Análisis

5.1. Revisión de literatura

En la *Tabla 2* se presentan las ecuaciones de búsqueda usadas para identificar los impactos ambientales de la actividad de fracturación hidráulica. Se observa que la mayoría de los artículos relacionados con los impactos ambientales de la fracturación hidráulica se enfocan en el componente agua con 67 de los 87 artículos encontrados. Además, hay pocos estudios realizados en países latinoamericanos con sólo dos artículos sobre el caso de Argentina y dos sobre el caso de México, los cuales para el primer caso fueron el resultado de conferencias sobre el proceso de fracturación hidráulica y para el segundo, se tratan de casos de estudios en el estado de Nuevo México (E.E.U.U). Además, no se encontraron estudios que se enfocaran

directa o explícitamente en los impactos ambientales de la actividad en los ecosistemas de humedal.

Después de realizar las búsquedas en Scopus, se obtuvieron 87 artículos para la búsqueda más general, de los cuales, luego de revisar el resumen se seleccionaron 54 artículos que abordaban los impactos ambientales del fracturación hidráulica en cada uno de los componentes del ambiente.



Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda y número de resultados por ecuación

ID_EC	Criterio de búsqueda	Numero de Resultados	Antes de 2009	2009-2019
A	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ*) OR TITLE-ABS- KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	87	5	82
B	TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND wetland*) OR TITLE-ABS- KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND wetland*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	0	0	0
C	TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND water*) OR TITLE-ABS- KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	67	4	63
D	TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND water* A ND tropic*) OR TITLE-ABS- KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND tropic*) AND (LIMIT- TO (SUBJAREA , "ENVI"))	0	0	0
E	TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND water* A ND latin america*) OR TITLE-ABS- KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND latin america*) AND (LIMIT- TO (SUBJAREA , "ENVI"))	0	0	0
F	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND brazil) OR TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND brazil)	0	0	0
G	TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND argentina) OR TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND argentina)	2	0	2
H	TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND mexico) OR TITLE-ABS- KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND mexico)	2	0	2
I	TITLE-ABS- KEY (frack* AND impact* AND ecosystem AND service*) OR TITLE- ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND environ* AND impact*) AND (LIMIT- TO (SUBJAREA , "ENVI"))	10	1	9

Por otro lado, se evidencia que la investigación sobre fracturación hidráulica es reciente ya que la mayoría de los artículos encontrados fueron publicados entre el 2009 y el 2019, con más del 90% de los resultados de cada búsqueda estando en este periodo de tiempo (*Figura 14a*) además, las ecuaciones de búsqueda A y C fueron las que arrojaron más resultados, lo que tiene sentido ya que éstas fueron las ecuaciones con menos filtros.

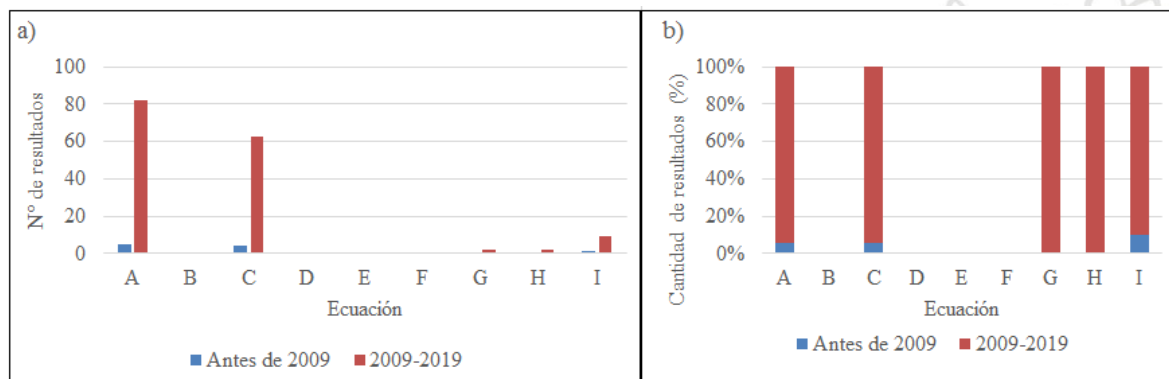


Figura 14. Número de resultados por ecuación de búsqueda antes del año 2009 y entre 2009 y 2019 (a) y porcentaje de artículos en los dos periodos de tiempo con respecto al total de resultados de cada ecuación (b)

En la *Figura 15* se presenta el momento de evaluación de cada uno de los artículos revisados. Se tiene que de 54 artículos, 39 tuvieron casos de estudios sobre impactos remanentes. La presencia de estos IAR pudo incidir en la necesidad de una evaluación expost, para determinar posibles deficiencias en la gestión ambiental de este tipo de proyectos de desarrollo.

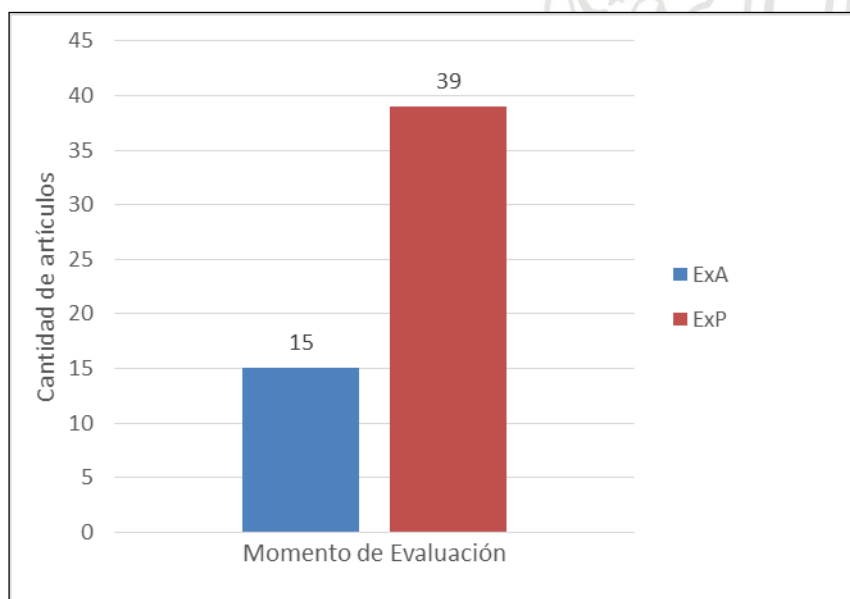


Figura 15. Momento de evaluación de los artículos revisados

En la *Figura 16* se presenta el enfoque de evaluación de cada uno de los artículos. Se observa que 31 artículos tuvieron un enfoque aplicado. Esto implica que realizaron modelos, encuestas o toma de muestras. En el caso de las muestras tomadas, de las pruebas en organismos y de las encuestas realizadas a la comunidad, se tiene información real de los impactos potenciales o remanentes de la actividad; y para el caso de los modelos, brindan herramientas para detectar tendencias del uso de los recursos naturales y pueden ser útiles a la hora de tomar decisiones de ordenamiento territorial. Los artículos con un enfoque teórico en cambio, dan una idea de las

tendencias en investigación y de cuáles son los vacíos de información sobre este tema en particular.

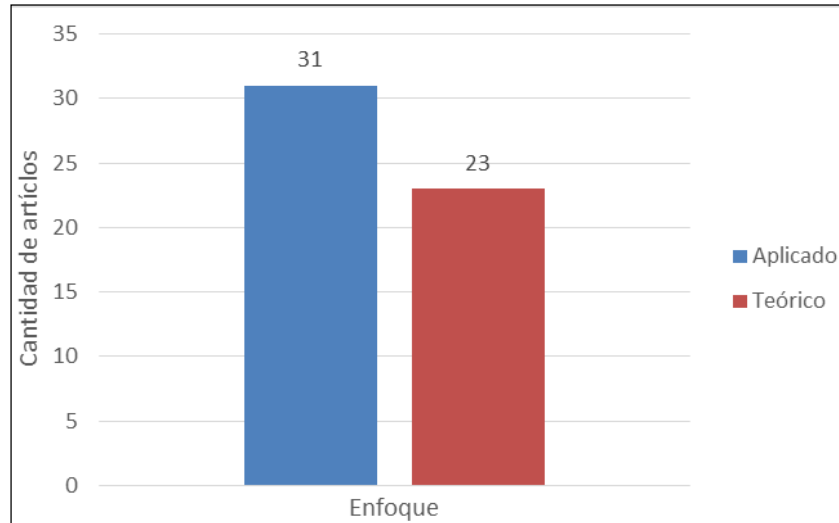


Figura 16. Enfoque de los artículos revisados

En la *Figura 17* se observa que el país en el que mayor número de estudios se tiene es Estados Unidos con 36 de los 54 artículos revisados. Esto tiene sentido ya que en este país se tiene el mayor desarrollo en el proceso de fracturación hidráulica. En siete artículos no se centró el enfoque en un país ya que el objetivo de éstos fue principalmente caracterizar los químicos más utilizados en el proceso y que propiedades toxicológicas tenía cada uno de ellos revisando bases de datos de divulgación voluntaria como FracFocus.

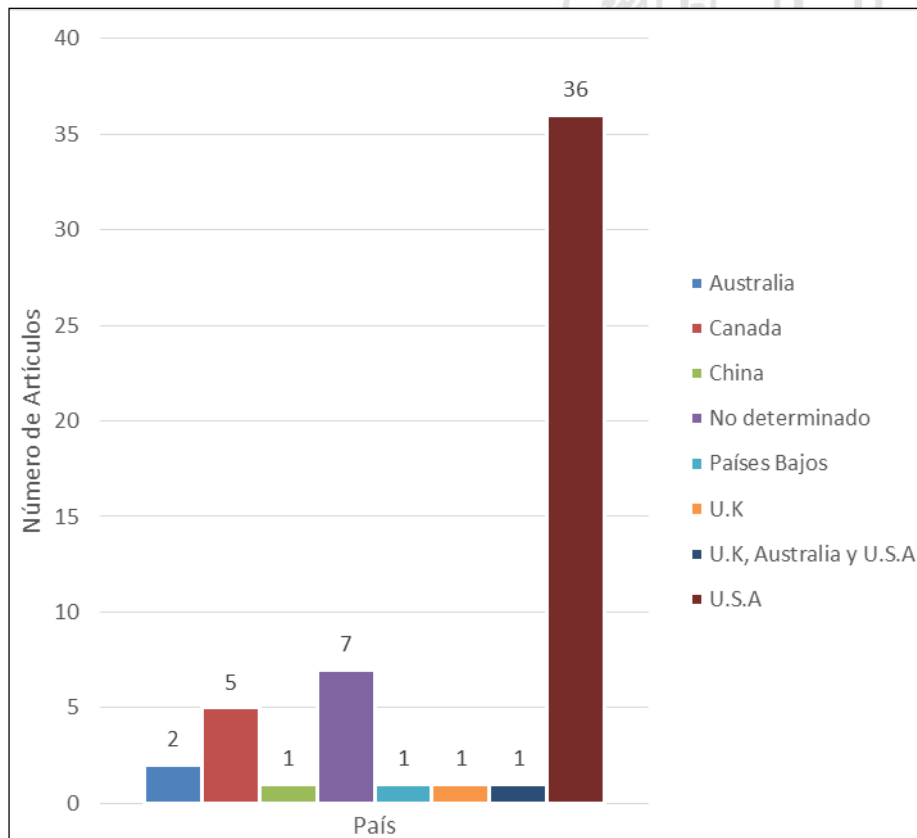


Figura 17. País del estudio

En la *Figura 18* se presentan el tipo de ecosistema estudiado en cada uno de los artículos revisados. La mayor parte de los artículos no tuvo un enfoque ecosistémico sino que analizaban los impactos sobre los componentes ambientales de forma aislada. Además, la mayoría de los autores que analizaron se enfocaron en los impactos ambientales sobre los ecosistemas acuáticos, asimismo, el ecosistema más analizado es el relacionado con cuerpos de agua loticos, lo que puede deberse a la preocupación de los ciudadanos acerca de cómo las actividades extractivas pueden afectar la calidad del agua para abastecimiento. Por otro lado, los artículos enfocados en ecosistemas terrestres están relacionados con cambios del uso del suelo (Moran, Cox, Wells, Benichou, & McClung, 2015) o con cambios en la distribución espacial de alguna especie (Northrup, Anderson, & Wittemyer, 2015).

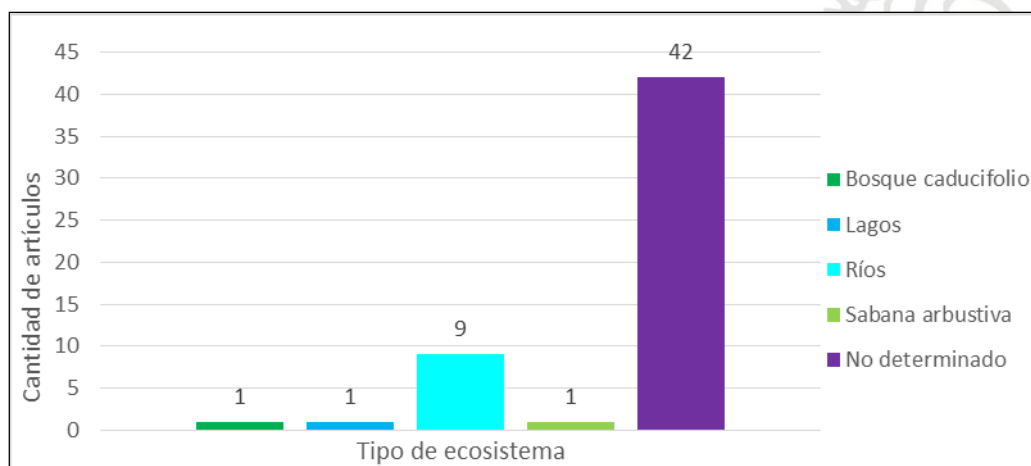


Figura 18. Ecosistemas analizados

5.2. Impactos ambientales identificados.

Luego de revisar los artículos, se identificaron 60 impactos ambientales diferentes. Los impactos se catalogaron según el componente ambiental, de esta manera se obtuvieron 17 categorías de impacto que se muestran en la

Tabla 3.

Tabla 3. Categorías de impacto (continúa en la siguiente página)

Factor Impactado	ID categoría	Impacto
Calidad química de las aguas superficiales	CQAS	Aumento en la salinidad de las aguas superficiales
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con metales pesados
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con hidrocarburos aromáticos policíclicos
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con sólidos suspendidos
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con compuestos orgánicos volátiles
		Acumulación de sedimentos en los cuerpos de aguas superficiales
Calidad química de las aguas subterráneas	CQAC	Aumento en la salinidad de las aguas subterráneas
		Contaminación de acuíferos con compuestos orgánicos volátiles
		Contaminación de acuíferos con metano
Propiedades físicas del agua	PFA	Disminución de los niveles de oxígeno disuelto en el agua
		Cambios en el pH de las aguas superficiales
		Cambios en el pH de las aguas subterráneas
Contaminación atmosférica	CATM	Contaminación atmosférica con compuestos orgánicos volátiles
		Contaminación atmosférica con material particulado
		Contaminación atmosférica con óxidos de nitrógeno
		Contaminación atmosférica con óxidos de azufre
		Contaminación atmosférica con metano
Propiedades químicas del suelo	PQS	Acumulación de biocidas en el suelo
		Salinización del suelo
		Acumulación de compuestos radioactivos en el suelo
Propiedades físicas del suelo	PFS	Cambios en el pH del suelo
		Erosión

Factor Impactado	ID categoría	Impacto
Hábitat	HBT	Fragmentación de hábitat
		Cambios en los patrones de distribución de la fauna silvestre
		Efecto borde
		Pérdida de hábitat
		Cambios en los patrones de migración de la fauna silvestre
Factor Impactado	Categoría	Impacto
Redes Tróficas	RDT	Alteración de las redes tróficas acuáticas
		Alteración en la actividad enzimática de los peces
		Disminución en la reproductividad de los invertebrados acuáticos
		Bioacumulación y biomagnificación de sustancias tóxicas en peces
		Disrupción endocrina en peces
		Alteración metabólica en mamíferos
		Lesiones branquiales en peces
		Toxicidad en organismos acuáticos
		Toxicidad por vía oral o respiratoria en mamíferos
Oferta hídrica	OH	Disminución de la presión de los acuíferos
		Aumento del estrés hídrico durante las sequías
Presión sonora	PS	Contaminación acústica
Gobernanza	GBRN	Conflictos de uso del agua
		Conflictos de uso del suelo
		Conflictos sociales
		Desarraigo cultural y social
		Aumento de la delincuencia
		Percepción social de inequidad económica
		Percepción social de disminución de la calidad de vida
Pérdida de gobernanza		
Economía	ECNM	Generación de empleo en áreas rurales
		Incremento en los precios de bienes y servicios
		Escasez de mano de obra en sectores diferentes al minero-energético
Propiedades microbiológicas del agua	PMBA	Citotoxicidad en bacterias

Factor Impactado	ID categoría	Impacto
		Pérdida de la diversidad microbiológica de las aguas superficiales
Ciclos biogeoquímicos	CBGQ	Alteración en los ciclos biogeoquímicos
Geotecnia	GTCN	Sismicidad Inducida
Demografía	DMGR	Defectos congénitos en humanos
		Citotoxicidad en humanos

En la *Figura 19* se tienen los impactos identificados según el tipo de ecosistema analizado. Se tiene que en los ecosistemas terrestres (bosque caducifolio y sabana arbustiva), se identificaron únicamente impactos asociados con pérdida, degradación o fragmentación de hábitat. La mayoría de autores identificaron impactos relacionados con cambios en la calidad química de las aguas superficiales o subterráneas, lo que implica que en futuros proyectos se deben tener medidas de gestión enfocadas en prevenir los impactos en estos componentes del ambiente. Por otro lado, pocos autores identificaron impactos relacionados con la dimensión social (gobernanza, demografía, economía, y paisaje) lo que indica que hay un vacío de información sobre este aspecto y que los futuros estudios de impacto ambiental deben enfocarse en este componente. Además, aunque es uno de los impactos que más preocupa a la sociedad, sólo dos de los artículos revisados mencionan la sismicidad inducida por fracturación hidráulica, sin embargo, Brantley et al., (2014); Jackson et al., (2015); Vengosh, Jackson, Warner, Darrah, & Kondash, (2014); Zhao, Ma, Liu, Feng, & Guo, (2018) mencionan las fallas existentes en el terreno cómo posibles mecanismos de migración de contaminantes a los acuíferos.

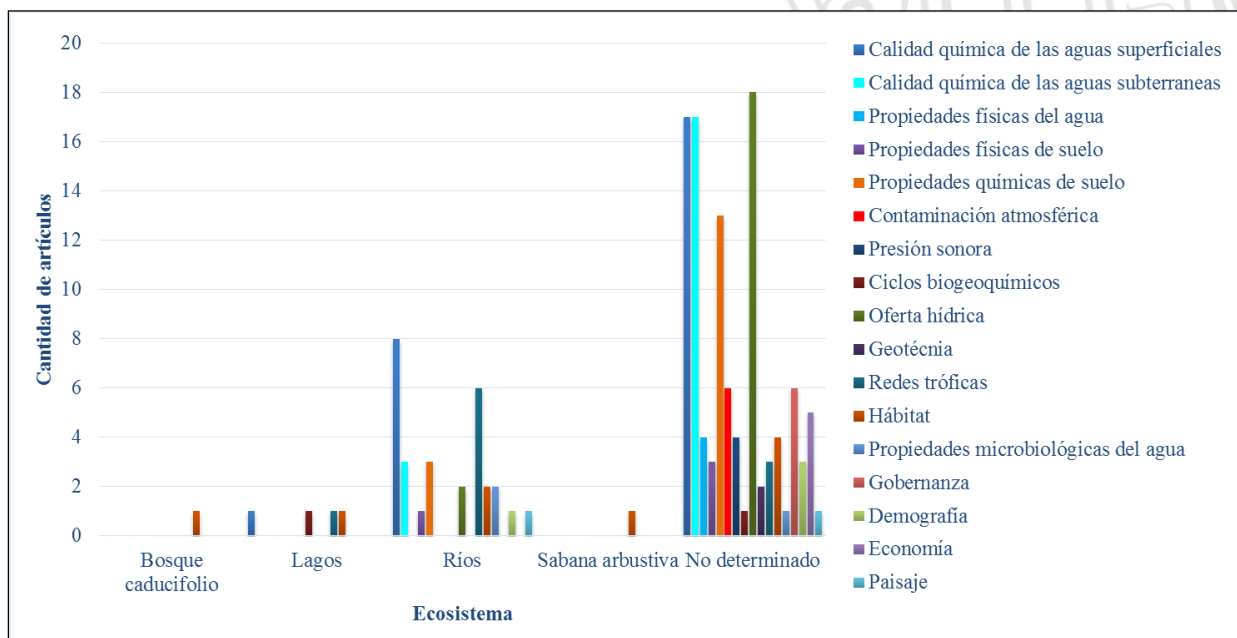


Figura 19. Impactos identificados en cada tipo de ecosistema

Además, en el Anexo 5 se observa que las acciones más impactantes sobre la dimensión física (propiedades fisicoquímicas del agua o del suelo) son las relacionadas con transporte de

líquidos y la disposición final de las aguas residuales producidas por esta actividad. La primera se debe a los derrames producidos durante el transporte de la mezcla fracturante hasta los campos de explotación o de las aguas residuales a los sitios de disposición final; y la segunda, está relacionado con el tratamiento inadecuado (los cuales sólo se encargan de remover sólidos suspendidos, materia orgánica y metales) antes de verter las aguas a cuerpos de aguas superficiales (Getzinger et al., 2015; Shrestha et al., 2017).

Por otro lado, la dimensión social se ve impactada principalmente por las acciones previas del proyecto como la adquisición de predios y la contratación de mano de obra no calificada, las cuales como se describe en Phelan & Jacobs (2016), hacen que los pobladores queden con la sensación de inequidad ya que sólo unos pocos (los que son contratados por estos proyectos, los que vendieron sus predios a buen precio o las grandes ciudades) reciben los beneficios económicos de la actividad mientras que la mayoría de los habitantes de zonas rurales deben enfrentar los pasivos ambientales de estos proyectos.

5.3. Funciones y servicios ecosistémicos impactados

La función ecosistémica asimilación de contaminantes se ve afectada por 22 de los impactos identificados, los cuales están relacionados con alteraciones en la calidad fisicoquímica del agua, la calidad del aire y las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esta función a su vez está relacionada con servicios ecosistémicos de regulación como la dilución de sustancias tóxicas en los distintos componentes ambientales y con el mantenimiento de la calidad de agua para los distintos usos (*Anexo 5*). Adicionalmente, 14 de los impactos identificados producen efectos sobre las redes tróficas, y afectan los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento de alimentos provenientes de la biota acuática (peces y moluscos) o de la fauna silvestre y doméstica; sin embargo, aunque los impactos sobre la fauna dulceacuícola descritos en Blewett et al. (2017); Folkerts et al. (2019); He, Flynn, et al. (2017); He, Folkerts, et al. (2017) fueron identificados a nivel de laboratorio, los químicos que causan estos impactos han sido encontrados en las muestras de aguas en campo dentro de los estudios de Getzinger et al. (2015); Lester et al. (2015); Maloney et al. (2017) ya sea como producto de un derrame o de la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua superficiales.

Además, 13 impactos identificados producen efectos sobre la dimensión social, por lo que aunque no existe una función ecosistémica impactada, pueden afectar los recursos por medio de la toma de decisiones de la comunidad (por ejemplo la decisión de no respetar una veda concertada o los límites de un área protegida debido a la pérdida de gobernanza) alterando la integridad ecológica de los ecosistemas y con ella las funciones y los servicios ecosistémicos.

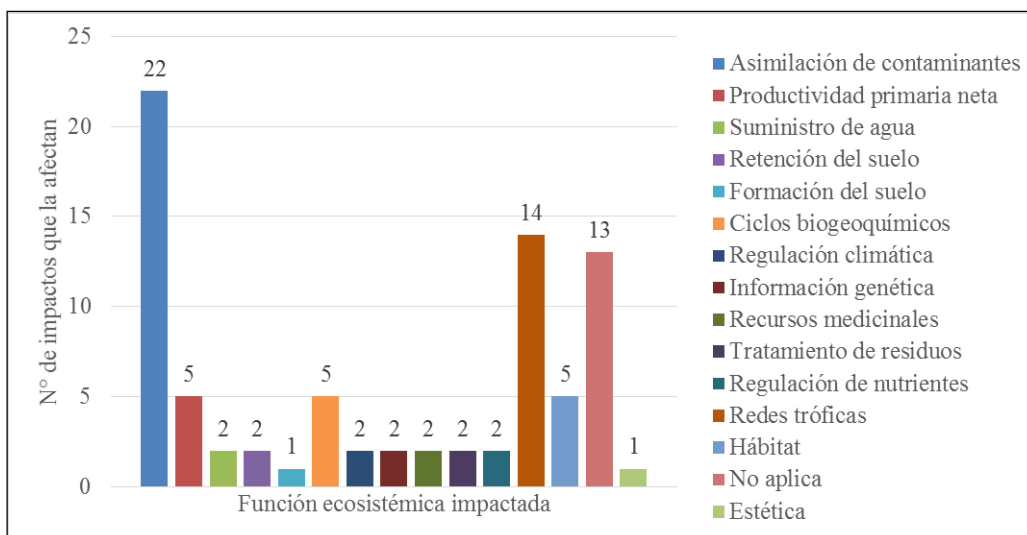


Figura 20. Funciones ecosistémicas impactadas.

Para el caso de los humedales de Colombia, el IAvH reunió un grupo de científicos para identificar las funciones y servicios ecosistémicos presentes en los humedales del país y posteriormente, realizó talleres participativos con expertos en humedales tropicales para valorar la importancia de cada función y servicio ecosistémico (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015b). Dentro de este ejercicio se destacó como prioritaria la función de regulación hídrica para el caso de los humedales interiores y los manglares. Esta función a su vez se relaciona con el bienestar humano a través del servicio ecosistémico de regulación hídrica, el cual es vital para el control de inundaciones. Sin embargo, esta función se puede ver comprometida por la fracturación hidráulica por la construcción de infraestructura para el transporte y almacenamiento de hidrocarburos o para la disposición final de aguas residuales ya que esto conduce a la impermeabilización del suelo, lo que altera la porosidad y permeabilidad del suelo y el ciclo hidrológico de estos ecosistemas (Souther et al., 2014).

Además, para el caso de lagunas y ciénagas se destaca la importancia de las funciones de producción, las cuales están relacionadas con los servicios de aprovisionamiento. Estas funciones pueden verse afectadas por las alteraciones en la calidad química del agua para los diferentes usos, y por los efectos que algunas sustancias presentes en la mezcla fracturante (la cual puede terminar en los cuerpos de agua superficial por derrames o disposición final inadecuada) producen en el funcionamiento de peces y moluscos. Adicionalmente, como se evidencia en el Volumen I de “*Colombia Anfibia: Un País de Humedales*” algunos humedales tienen asociaciones con sistemas acuíferos (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015c), sin embargo como se evidencia en el “*Reporte de Avance del Estudio Nacional de Agua*” publicado por el IDEAM, (2018), sólo 29% de los acuíferos superficiales del país cuentan con información suficiente sobre su dinámica y funcionamiento (Figura 21). Adicionalmente, los modelos hidrogeológicos son muy teóricos y no permiten predecir con certeza cuál será la respuesta de los acuíferos a las distintas presiones, tanto ambientales como antrópicas (Betancur, Palacio T., & Escobar M., 2012).

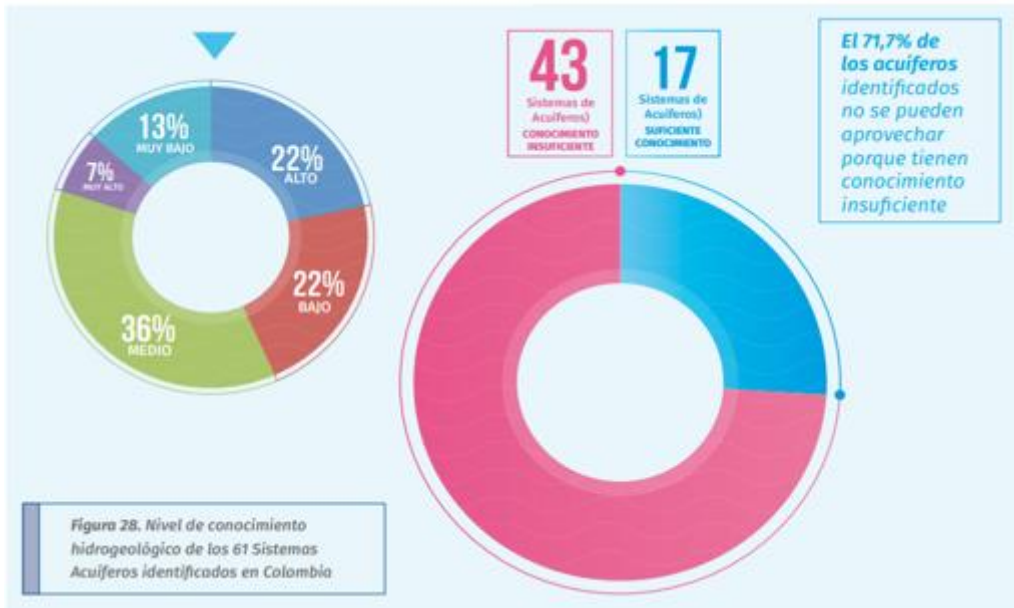


Figura 21. Nivel de conocimiento hidrogeológico de los 61 Sistemas de Acuíferos identificados en Colombia, tomado del Reporte de Avance del Estudio Nacional del Agua (2018)

Por otro lado, como se evidencia en el volumen II “Colombia Anfibia: Un País de humedales” el conocimiento de los humedales también es limitado ya que de los 3,783 documentos consultados, la mayoría se centran en sitios puntuales (2,186 documentos), además, la fuente principal de información sobre los humedales del país son los trabajos de grado (1093 documentos) mientras que sólo 583 documentos corresponden a artículos de revistas científicas, (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015b).

5.4 Aspectos a tener en cuenta en la evaluación de impacto ambiental en proyectos de fracturación hidráulica

En la *Tabla 4* se presenta una síntesis de los principales elementos a tener en cuenta en la elaboración de los términos de referencia para el ejercicio de fracturación hidráulica, con énfasis en el establecimiento de línea base y la identificación de servicios ecosistémicos afectados.

Tabla 4. Aspectos a tener en cuenta en la evaluación de impacto ambiental de los proyectos de fracturación hidráulica. Adaptada de la Metodología para la evaluación de impactos ambientales de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

Dimensión	Componente	Aspectos a evaluar	
Física	Geológico	1. Fallas, fracturas y zonas de concentración de esfuerzos tectónicos	
	Geomorfológico	2. Zonas propensas a desastres naturales	
	Edafológico	3. Usos actuales y potenciales del suelo	
	Hidrológico		4. Eventos extremos
			5. Oferta hídrica de las cuencas abastecedoras y de los ecosistemas de humedal durante años Niño
			6. Oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático de los ecosistemas de humedal
			7. Usos actuales y potenciales
	Hidrogeológico		8. Usos actuales y potenciales de las aguas subterráneas
			9. Zonas de recarga, tránsito y descarga de flujo, y direcciones de flujo
			10. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos

<i>Dimensión</i>	<i>Componente</i>	<i>Aspectos a evaluar</i>
	Paisaje	11. Compatibilidad del proyecto con el paisaje actual 12. Infraestructura social
	Atmosférico	13. Fuentes de emisión 14. Modelos de calidad de aire 15. Fuentes de ruido y sus receptores en asentamientos humanos
<i>Biótica</i>	Ecosistemas terrestres	16. Análisis de fragmentación 17. Áreas de importancia para cría, reproducción, alimentación y anidación, así como zonas de paso de especies migratorias 18. Especies de especial importancia por su categoría de amenaza o por su grado de restricción
	Ecosistemas acuáticos	19. Fragmentación de ecosistemas acuáticos
	Áreas de especial interés ambiental	20. Ecosistemas sensibles y estratégicos 21. Funcionalidad ecológica de los ecosistemas afectados 22. Áreas con prioridades de conservación 23. Reservas forestales de la ley segunda.
<i>Social</i>	Demográfico	24. Distribución de población por edad y sexo
	Espacial	25. Cobertura de servicios públicos
	Económico	26. Estructura de la propiedad 27. Mercado laboral actual 28. Infraestructura existente y proyectada
	Cultural	29. Relación de los locales con los recursos naturales 30. Comunidades étnicas
	Arqueológico	31. Sitios de interés histórico potencial y actual
	Político-organizativo	32. Presencia del estado 33. Presencia de organizaciones parainstitucionales 34. Procesos de restitución de tierras
	Tendencias del desarrollo	35. Planes de ordenamiento territorial

Para los humedales, el componente hidrológico es muy importante ya que están sujetos a dinámicas de pulsos con periodos de inundaciones y de estiaje, los cuales se ven exacerbados por el fenómeno del Niño y por el cambio climático. Es por ello que es importante conocer como la dinámica de estos ecosistemas se ve afectada por estos. Además, los humedales interactúan con las aguas subterráneas de formas complejas por lo que es importante conocer que tan susceptibles son los acuíferos a la contaminación y si éstos pueden a su vez alterar las propiedades fisicoquímicas de los humedales.

Los humedales son considerados ecosistemas estratégicos en Colombia debido a su capacidad para proveer servicios ecosistémicos y por mantener el equilibrio ecológico (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2016). Adicionalmente, en la cuenca del Magdalena, sobre la cual se encuentra gran parte de los bloques con potencial para fracturación hidráulica, los pulsos de los humedales y la consecuente conexión y desconexión del río con sus ciénagas determinan el inicio y el fin de las migraciones de los peces y, en el caso particular del bocachico, la maduración de sus gónadas da inicio a la temporada reproductiva. El balance de esta cadena es integral: afectar una de sus partes puede tener repercusiones en las demás (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015), por lo que dentro de estos ecosistemas la fragmentación podría tener grandes repercusiones para la biota acuática y para las comunidades pesqueras que viven de ella. Por otro lado estos ecosistemas son lugares de paso para numerosas aves migratorias, entre las cuales se encuentran la Reinita (*Setophaga striata*) y el ganzo del Orinoco (*Neochen jubata*)

que según la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) se encuentran casi amenazadas, por lo que es fundamental conocer como la fracturación hidráulica puede afectar el comportamiento de estas especies.

6. Conclusiones

Teniendo en cuenta la poca información que existe sobre los acuíferos de Colombia, y la frecuencia con la cual se mencionaron impactos sobre ellos a causa de la fracturación hidráulica en los artículos consultados, es importante estudiar a fondo los sistemas acuíferos del país antes de iniciar cualquier proyecto de fracturación hidráulica. Además, uno de los impactos más mencionados es el que se da sobre la calidad de las aguas superficiales, el cual también es producido por otras actividades (como la explotación convencional de petróleo o la minería de aluvial de oro) por lo cual es necesario realizar análisis de impactos acumulativos sobre el componente hidrológico en conjunto con las evaluaciones de impacto ambiental. Adicionalmente, la fracturación hidráulica puede entrar a competir por la demanda de agua con otras actividades productivas, lo que sumado a los impactos sobre la calidad del agua y la disminución del caudal de las cuencas hidrográficas por causa del cambio climático, puede generar conflictos de uso de agua, por lo cual es necesario modelar cómo se comportará la oferta hídrica bajo los diferentes escenarios propuestos por el IPCC para determinar si ésta puede suplir la demanda de todas las actividades productivas, y al mismo tiempo garantizar el caudal ecológico. Por otro lado, para la ejecución de los proyectos de fracturación hidráulica es necesario construir infraestructura vial, la cual por su naturaleza genera fragmentación de hábitat, por ende es importante estudiar a fondo la fauna que habita en las zonas donde se ejecutarán los proyectos y que estrategias de conectividad ecológica (como puentes o pasos de fauna) se adaptan a cada una de ellas. Igualmente, en vista de los pocos estudios sobre los impactos sociales que tiene la fracturación hidráulica, de la complejidad sociocultural que existe en el país, y de las posibles implicaciones que tiene la pérdida de gobernanza sobre el uso de los recursos naturales, es necesario hacer estudios socioeconómicos que incluyan modelos de toma de decisiones para entender cómo interactúan el área de influencia y el proyecto.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2018). Estado de contratos Vigentes.
- Akanni, A., Onwuteaka, J., Uwagbae, M., Mulwa, R., & Elegbede, I. O. (2017). The Values of Mangrove Ecosystem Services in the Niger Delta Region of Nigeria. In *The Political Ecology of Oil and Gas Activities in the Nigerian Aquatic Ecosystem*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809399-3.00025-2>
- Angel, E., Carmona, S. I., & Villegas, L. C. (2010). *Gestión ambiental en proyectos de desarrollo*.
- Bertinat, P., D'Elía, E., Ochandio, R., Svampa, M., & Viale, E. (2014). *20 mitos y Realidades del Fracking*.
- Betancur, T., Palacio T., C. A., & Escobar M., J. F. (2012). Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results. *Hydrogeology - A Global Perspective*, (February). <https://doi.org/10.5772/28155>

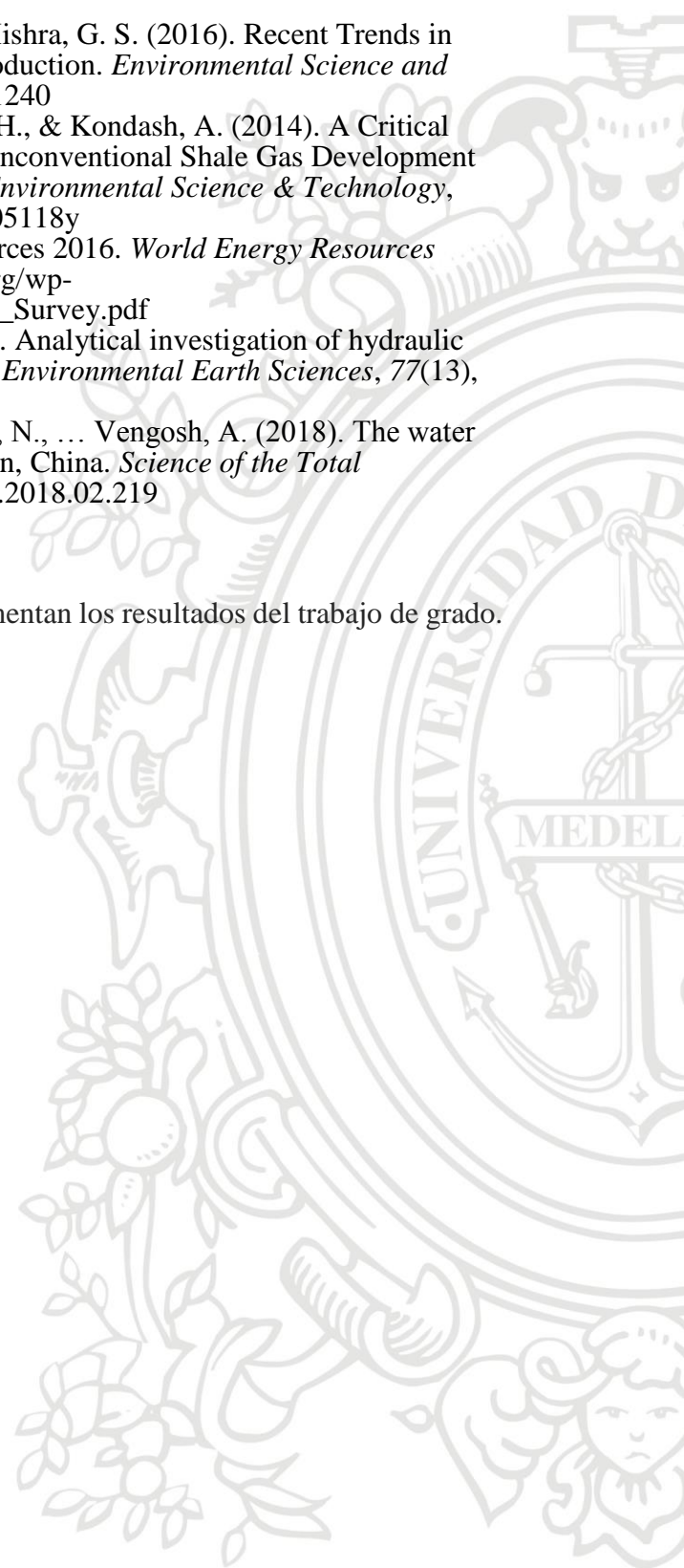
- Blewett, T. A., Delompré, P. L. M., He, Y., Folkerts, E. J., Flynn, S. L., Alessi, D. S., & Goss, G. G. (2017). Sublethal and Reproductive Effects of Acute and Chronic Exposure to Flowback and Produced Water from Hydraulic Fracturing on the Water Flea *Daphnia magna*. *Environmental Science & Technology*, 51(5), 3032–3039. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05179>
- Brantley, S. L., Yoxtheimer, D., Arjmand, S., Grieve, P., Vidic, R., Pollak, J., ... Simon, C. (2014). Water resource impacts during unconventional shale gas development: The Pennsylvania experience. *International Journal of Coal Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.12.017>
- Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>
- Burton, G. A., Basu, N., Ellis, B. R., Kapo, K. E., Entrekin, S., & Nadelhoffer, K. (2014). Hydraulic “Fracking”: Are surface water impacts an ecological concern? *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(8), 1679–1689. <https://doi.org/10.1002/etc.2619>
- Carpenter, S. R., Stanley, E. H., & Vander Zanden, M. J. (2011). *State of the World’s Freshwater Ecosystems: Physical, Chemical, and Biological Changes*. SSRN. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524>
- Chen, S. S., Sun, Y., Tsang, D. C. W., Graham, N. J. D., Ok, Y. S., Feng, Y., & Li, X. D. (2017). Potential impact of flowback water from hydraulic fracturing on agricultural soil quality: Metal/metalloid bioaccessibility, Microtox bioassay, and enzyme activities. *Science of the Total Environment*, 579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.141>
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Deal, B., Destouni, G., Cvetkovic, V., Goldenberg, R., Kalantari, Z., & Mörtberg, U. (2017). Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.130>
- Elliott, E. G., Ettinger, A. S., Leaderer, B. P., Bracken, M. B., & Deziel, N. C. (2017). A systematic evaluation of chemicals in hydraulic-fracturing fluids and wastewater for reproductive and developmental toxicity. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.81>
- Filteau, M. (2011). Residents’ Perceptions of Community and Environmental Impacts from Development of Natural Gas in the Marcellus Shale. *Journal of Rural Social Sciences*.
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Folkerts, E. J., Blewett, T. A., Delompré, P., Mehler, W. T., Flynn, S. L., Sun, C., ... Goss, G. G. (2019). Toxicity in aquatic model species exposed to a temporal series of three different flowback and produced water samples collected from a horizontal hydraulically fractured well. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.054>
- Getzinger, G. J., O’Connor, M. P., Hoelzer, K., Drollette, B. D., Karatum, O., Deshusses, M. A., ... Plata, D. L. (2015). Natural Gas Residual Fluids: Sources, Endpoints, and Organic Chemical Composition after Centralized Waste Treatment in Pennsylvania. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00471>
- He, Y., Flynn, S. L., Folkerts, E. J., Zhang, Y., Ruan, D., Alessi, D. S., ... Goss, G. G. (2017). Chemical and toxicological characterizations of hydraulic fracturing flowback and produced water. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.027>
- He, Y., Folkerts, E. J., Zhang, Y., Martin, J. W., Alessi, D. S., & Goss, G. G. (2017). Effects on biotransformation, oxidative stress, and endocrine disruption in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to hydraulic fracturing flowback and produced water. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04695>
- Ibarra, K. P., Gómez, M. C., Vilorio, E. A., Arteaga, E., Cuadrado, I., Martínez, M. F., ... Rueda, M. (2014). Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y los recursos pesqueros durante la

- rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *INVEMAR. Informe Tecnico Final*, 140 + anexos. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.180403>
- IDEAM. (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua (2018). *Cartilla ENA 2018*, 56. Retrieved from http://informatica.cdt.cl/documentos/publicaciones/documentos_tecnicos/compendios.html
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua (2018)*. Retrieved from http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2015a). *Colombia Anfibia Vol. 1. Instituto Alexander von Humboldt* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2015b). *Colombia Anfibia Vol. 2. Igarss 2014*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2016). *Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- Jackson, R. B., Lowry, E. R., Pickle, A., Kang, M., DiGiulio, D., & Zhao, K. (2015). The Depths of Hydraulic Fracturing and Accompanying Water Use Across the United States. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01228>
- Kolka, R. K., Murdiyarso, D., Kauffman, J. B., & Birdsey, R. A. (2016). Tropical wetlands, climate, and land-use change: adaptation and mitigation opportunities. *Wetlands Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9487-x>
- Langan, C., Farmer, J., Rivington, M., & Smith, J. U. (2018). Tropical wetland ecosystem service assessments in East Africa; A review of approaches and challenges. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.022>
- Lester, Y., Ferrer, I., Thurman, E. M., Sitterley, K. A., Korak, J. A., Aiken, G., & Linden, K. G. (2015). Characterization of hydraulic fracturing flowback water in Colorado: Implications for water treatment. *Science of The Total Environment*, 512–513, 637–644. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.01.043>
- Maloney, K. O., Baruch-Mordo, S., Patterson, L. A., Nicot, J.-P., Entekin, S. A., Fargione, J. E., ... Wiseman, H. J. (2017). Unconventional oil and gas spills: Materials, volumes, and risks to surface waters in four states of the U.S. *Science of The Total Environment*, 581–582, 369–377. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.12.142>
- Maloney, K. O., Young, J. A., Faulkner, S. P., Hailegiorgis, A., Slonecker, E. T., & Milheim, L. E. (2018). A detailed risk assessment of shale gas development on headwater streams in the Pennsylvania portion of the Upper Susquehanna River Basin, U.S.A. *Science of the Total Environment*, 610–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.247>
- McLaughlin, M. C., Borch, T., & Blotvogel, J. (2016). Spills of Hydraulic Fracturing Chemicals on Agricultural Topsoil: Biodegradation, Sorption, and Co-contaminant Interactions. *Environmental Science and Technology*, 50(11). <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00240>
- Measham, T. G., & Fleming, D. A. (2014). Impacts of unconventional gas development on rural community decline. *Journal of Rural Studies*, 36, 376–385. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2014.04.003>
- Moran, M. D., Cox, A. B., Wells, R. L., Benichou, C. C., & McClung, M. R. (2015). Habitat Loss and Modification Due to Gas Development in the Fayetteville Shale. *Environmental Management*, 55(6), 1276–1284. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0440-6>
- Northrup, J. M., Anderson, C. R., & Wittemyer, G. (2015). Quantifying spatial habitat loss from hydrocarbon development through assessing habitat selection patterns of mule deer. *Global Change Biology*, 21(11), 3961–3970. <https://doi.org/10.1111/gcb.13037>
- Phelan, A. (Any), & Jacobs, S. (2016). Facing the true cost of fracking; social externalities and the role of integrated valuation. *Ecosystem Services*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.006>
- Shrestha, N., Chilkoor, G., Wilder, J., Gadhamshetty, V., & Stone, J. J. (2017). Potential water resource impacts of hydraulic fracturing from unconventional oil production in the Bakken shale. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.006>

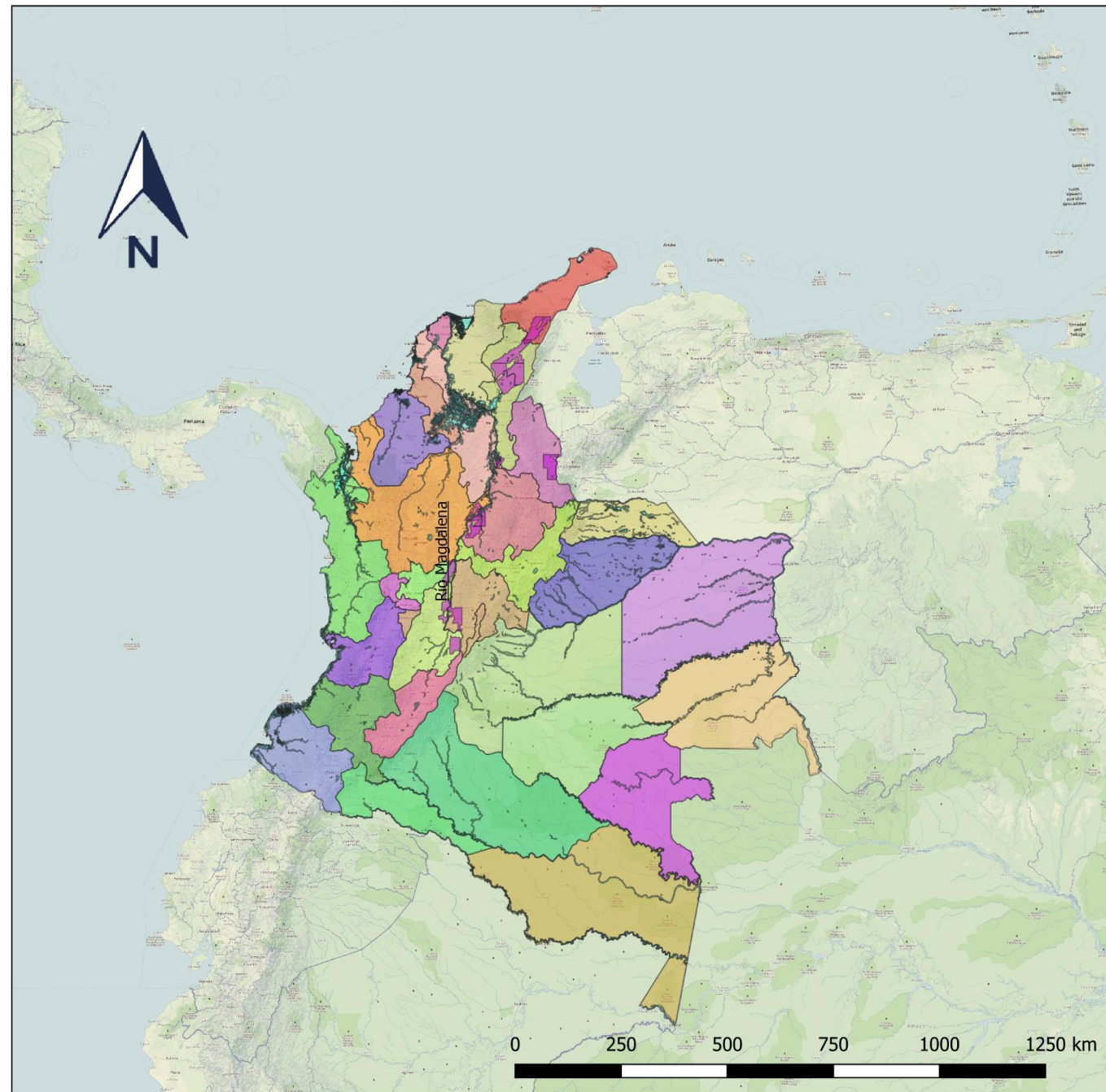
- Souther, S., Tingley, M. W., Popescu, V. D., Hayman, D. T., Ryan, M. E., Graves, T. A., ... Terrell, K. (2014). Biotic impacts of energy development from shale: research priorities and knowledge gaps. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(6), 330–338. <https://doi.org/10.1890/130324>
- Tiedeman, K., Yeh, S., Scanlon, B. R., Teter, J., & Mishra, G. S. (2016). Recent Trends in Water Use and Production for California Oil Production. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01240>
- Vengosh, A., Jackson, R. B., Warner, N., Darrah, T. H., & Kondash, A. (2014). A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8334–8348. <https://doi.org/10.1021/es405118y>
- World Energy Council. (2016). World Energy Resources 2016. *World Energy Resources 2016*. https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf
- Zhao, H., Ma, F., Liu, G., Feng, X., & Guo, J. (2018). Analytical investigation of hydraulic fracture-induced seismicity and fault activation. *Environmental Earth Sciences*, 77(13), 526. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7708-8>
- Zou, C., Ni, Y., Li, J., Kondash, A., Coyte, R., Lauer, N., ... Vengosh, A. (2018). The water footprint of hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.219>

Anexos

A continuación se presentan los anexos que complementan los resultados del trabajo de grado.



Anexo 1. Ubicación de los lugares con potencial para la fracturación hidráulica con respecto a los ecosistemas de humedal



Convenciones

- Ecosistemas de humedal
- Bloques con potencial para fracking

Plataforma continental de Colombia

- AMAZONAS
- ANTIOQUIA
- ARAUCA
- ATLANTICO
- BOLIVAR
- BOYACA
- CALDAS
- CAQUETA
- CASANARE
- CAUCA
- CESAR
- CHOCO
- CORDOBA
- CUNDINAMARCA
- GUAINIA
- GUAJIRA
- GUAVIARE
- HUILA
- MAGDALENA
- META
- NARIÑO
- NORTE DE SANTANDER
- PUTUMAYO
- QUINDIO
- RISARALDA
- SANTANDER
- SUCRE
- TOLIMA
- VALLE DEL CAUCA
- VAUPES
- VICHADA

Mapa Base

Anexo 2. Ecuaciones de búsqueda

ID_EC	Criterio de búsqueda	Numero de Resultados	Antes de 2009	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2009-2019
A	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ*) OR TITLE-ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	87	5	2	1	0	9	5	16	12	12	7	10	8	82
B	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND wetland*) OR TITLE-ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND wetland*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND water*) OR TITLE-ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	67	4	2	1	0	9	4	11	8	9	6	9	4	63
D	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND water* AND tropic*) OR TITLE-ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND tropic*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND environ* AND water* AND latin america*) OR TITLE-ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND latin america*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND brazil) OR TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND environ* AND impact* AND water* AND brazil)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND argentina) OR TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND argentina)	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
H	TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND mexico) OR TITLE-ABS-KEY (frack* AND petrol* AND impact* AND water* AND mexico)	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2
I	TITLE-ABS-KEY (frack* AND impact* AND ecosystem AND service*) OR TITLE-ABS-KEY (hydraulic* AND frac* AND environ* AND impact*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	10	1	0	0	1	0	0	0	1	2	2	2	1	9

Anexo 3. Revistas consultadas

Revista	Impact Factor	N° de artículos consultados
Atmospheric Environment	4,012	1
Ecosystem Services	5,572	1
Ecotoxicology and Environmental Safety	4,527	1
Environmental Managment	2,376	1
Environmental Science & Technology	6,198	19
Environmental Science & Technology Letters	6,934	2
Environmental Science: Processes & Impacts	2,688	2
Environmental Toxicology and Chemistry	3,421	1
Frontiers in Ecology and the Environment	5,13	1
Global Change Biology	8,997	1
International Journal of Coal Geology	5,33	2
Journal of Environmental Management	4,865	2
Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology	2,927	1
Journal of Great Lakes Research	2,175	1
Journal of Hazardous Materials	7,65	1
Journal of Rural Studies	3,301	2
Resource and Energy Economics	2,367	1
Science	37,205	1
Science Advances	12,804	1
Science of The Total Environment	4,9	10
Water Research	7,051	2

Autores	Año	Journals	País	Enfoque	MoEva	Ecosistema de interes	Tipo de ecosistema	CQAS	CQAC	PF A	PF S	PQ S	CAT M	P S	CBG Q	O H	GCT N	RD T	HB T	PMB A	GBR N	DMG R	ECN M	PS J	
Reedy, & McDaid		Technology																							
Nicot, Scanlon, Reedy, & Costley	2014	Science of The Total Environment	U.S.A	A	ExP	No determinado	No determinado	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Phelan & Jacobs	2016	Ecosystem Services	Australia	A	ExP	No determinado	No determinado	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Measham & Fleming	2014	Journal of Rural Studies	Australia	A	ExA	No determinado	No determinado	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Filteau	2011	Journal of Rural Studies	U.S.A	A	ExP	No determinado	No determinado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
Entrekin et al	2018	Environmental Science & Technology	U.S.A	A	ExA	Ecosistema Dulceacuicola	No determinado	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
McLaughlin, Borch, & Blotevogel	2016	Environmental Science & Technology	U.S.A	A	ExP	No determinado	No determinado	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maloney et al	2018	Science of The Total Environment	U.S.A	A	ExP	Ecosistema Dulceacuicola	Ríos	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Blewett et al	2017	Environmental Science & Technology	Canada	A	ExP	Ecosistema Dulceacuicola	Ríos	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0

Autores	Año	Journals	País	Enfoque	MoEva	Ecosistema de interes	Tipo de ecosistema	CQAS	CQAC	PFA	PFS	PQS	CATM	PS	CBGQ	OH	GCTN	RD T	HB T	PMB A	GBR N	DMG R	ECN M	PS J
Pinti, Gelinas, Moritz, Larocque, & Sano	2016	Science of The Total Environment	Canada	A	ExA	No determinado	No determinado	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moran, Cox, Wells, Benichou, & McClung	2015	Environmental Management	U.S.A	A	ExP	Ecosistema Terrestre	Bosque caducifolioso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Nicot & Scanlon	2012	Environmental Science & Technology	U.S.A	A	ExA	No determinado	No determinado	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Folkerts et al	2019	Ecotoxicology and Environmental Safety	Canada	A	ExP	Ecosistema Dulceacuicola	Ríos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Akob et al	2016	Environmental Science & Technology	U.S.A	A	ExP	Ecosistema Dulceacuicola	Ríos	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Kassotis et al	2016	Science of The Total Environment	U.S.A	A	ExP	Ecosistema Dulceacuicola	Ríos	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0

Anexo 5. Funciones y servicios ecosistémicos susceptibles a ser impactados (continúa en páginas siguientes)

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con sólidos disueltos	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para generación de energía eléctrica
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso agropecuario
Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con metales pesados	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso agropecuario
Aumento en la salinidad de las aguas superficiales	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para generación de energía eléctrica
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso agropecuario

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con hidrocarburos aromáticos policíclicos	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para uso agropecuario
Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con sólidos suspendidos	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para generación de energía eléctrica
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso agropecuario
Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para uso agropecuario
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para consumo humano
Acumulación de sedimentos en los cuerpos de aguas superficiales	Físico	Calidad química del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para uso agropecuario
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para generación de energía eléctrica
Aumento en la salinidad de las aguas subterráneas	Físico	Calidad química del agua	Exp	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para uso agropecuario
Contaminación de acuíferos con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad química del agua	Exp	Asimilación de contaminantes	Calidad del agua para uso agropecuario
					Calidad del agua para consumo humano
Contaminación de acuíferos con metano	Físico	Calidad química del agua	Exp	Asimilación de contaminantes	Calidad del agua para uso agropecuario
					Calidad del agua para consumo humano
Disminución de los niveles de oxígeno disuelto en el agua	Físico	Propiedades físicas del agua	Exp	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para uso agropecuario

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
Cambios en el pH de las aguas superficiales	Físico	Propiedades físicas del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para generación de energía eléctrica
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso agropecuario
Cambios en el pH de las aguas subterráneas	Físico	Propiedades físicas del agua	ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en el agua
					Calidad del agua para consumo humano
					Calidad del agua para uso recreativo
					Calidad del agua para generación de energía eléctrica
					Calidad del agua para piscicultura
					Calidad del agua para uso agropecuario
Aumento del estrés hídrico durante sequías	Físico	Oferta hídrica	ExP	Suministro de agua	Cantidad de agua para generación de energía eléctrica
					Cantidad de agua para uso agropecuario
					Cantidad de agua para consumo humano
					Cantidad de agua para piscicultura

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
Disminución en la presión de los acuíferos	Físico	Oferta hídrica	ExP	Suministro de agua	Cantidad de agua para uso agropecuario
					Cantidad de agua para consumo humano
Acumulación de compuestos radioactivos en el suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo	ExP	Productividad primaria neta	Suelo para agricultura
				Asimilación de contaminantes	
Acumulación de biocidas en el suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo	ExP	Productividad primaria neta	Suelo para agricultura
				Asimilación de contaminantes	
Salinización del suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo	ExP	Productividad primaria neta	Suelo para agricultura
				Asimilación de contaminantes	
Erosión	Físico	Propiedades físicas del suelo	ExP	Productividad primaria neta	Suelo para agricultura
				Retención del suelo	
				Formación de suelos	
Cambios en el pH del suelo	Físico	Propiedades físicas del suelo	ExP	Productividad primaria neta	Suelo para agricultura
				Asimilación de contaminantes	
Sismicidad Inducida	Físico	Geotecnia	ExP	Retención del suelo	Suelo para agricultura
Contaminación atmosférica con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad del aire	ExP	Ciclos biogeoquímicos	Regulación climática
				Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en la atmósfera
Contaminación atmosférica con óxidos de nitrógeno	Físico	Calidad del aire	ExP	Ciclos biogeoquímicos	Regulación climática
				Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en la atmósfera
Contaminación atmosférica con óxidos de azufre	Físico	Calidad del aire	ExP	Ciclos biogeoquímicos	Regulación climática
				Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en la atmósfera
Contaminación atmosférica con metano	Físico	Calidad del aire	ExP	Ciclos biogeoquímicos	Regulación climática

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
			ExP	Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes de la atmósfera
Contaminación atmosférica con material particulado	Físico	Calidad del aire	ExP	Regulación climática	Regulación climática
				Asimilación de contaminantes	Dilución de contaminantes en la atmósfera
Contaminación acústica	Físico	Calidad del aire	ExP	Regulación climática	Mitigación del ruido
Alteración en los ciclos biogeoquímicos	Físico	Ciclos biogeoquímicos	ExP	Ciclos biogeoquímicos	Regulación climática
Pérdida de diversidad microbiológica en cuerpos de aguas superficiales	Biótico	Biodiversidad	ExP	Información genética	Material genético de microorganismo para producción de medicamentos
				Recursos medicinales	
				Tratamiento de residuos	Detoxificación de las aguas por acción de los microorganismos
				Regulación de nutrientes	Fertilización de suelos agrícolas por acción de los microorganismos
					Mantenimiento de la productividad de los suelos
Citotoxicidad en bacterias	Biótico	Biodiversidad	ExA	Información genética	Material genético de microorganismo para producción de medicamentos
				Recursos medicinales	
				Tratamiento de residuos	Detoxificación de las aguas por acción de los microorganismos
				Regulación de nutrientes	Fertilización de suelos agrícolas por acción de los microorganismos
					Mantenimiento de la productividad de los suelos
Disminución en la reproductividad de invertebrados acuáticos	Biótico	Fauna dulceacuícola	ExA	Redes tróficas	Moluscos para consumo humano

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
Alteración en la actividad enzimática de los peces	Biótico	Fauna dulceacuícola	ExA	Redes tróficas	Peces para consumo humano
Disrupción endocrina en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola	ExA	Redes tróficas	Peces para consumo humano
Lesiones branquiales en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola	ExA	Redes tróficas	Peces para consumo humano
Bioacumulación y biomagnificación de sustancias tóxicas en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola	ExA	Redes tróficas	Peces para consumo humano
Toxicidad en organismos acuáticos	Biótico	Fauna dulceacuícola	ExA	Redes tróficas	Peces para consumo humano
					Moluscos para consumo humano
Alteración de las redes tróficas acuáticas	Biótico	Ecosistemas acuáticos	ExP	Redes tróficas	Control biológico de plagas
					Peces para consumo humano
Toxicidad por vía oral o respiratoria en mamíferos	Biótico	Mamíferos	ExA	Redes tróficas	Fauna silvestre para consumo humano
					Fauna doméstica para consumo humano
Alteración metabólica en mamíferos	Biótico	Mamíferos	ExA	Redes tróficas	Fauna silvestre para consumo humano
					Fauna doméstica para consumo humano
Mortalidad y morbilidad en ganado	Biótico	Mamíferos	ExP	Redes tróficas	Fauna doméstica para consumo humano
Fragmentación de hábitat	Biótico	Conectividad ecológica	ExP	Hábitat	Control biológico de plagas
					Fauna silvestre para consumo humano
Pérdida de hábitat	Biótico	Biodiversidad	ExP	Hábitat	Fauna silvestre para consumo humano
				Redes tróficas	Control biológico de plagas
Efecto borde	Biótico	Ecosistemas terrestres	ExP	Hábitat	Fauna silvestre para consumo humano

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
					Control biológico de plagas
Disminución de la población de fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad	ExP	Redes tróficas	Fauna silvestre para consumo humano
					Control biológico de plagas
Cambios en los patrones de distribución de la fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad	ExP	Hábitat	Fauna silvestre para consumo humano
				Redes tróficas	Control biológico de plagas
Cambios en los patrones de migración de la fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad	ExP	Hábitat	Fauna silvestre para consumo humano
				Redes tróficas	Control biológico de plagas
Conflictos de uso del suelo	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Conflictos de uso de agua	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Conflictos sociales	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Desarraigo cultural y social	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Percepción social de inequidad económica	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Percepción social de disminución de la calidad de vida	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Pérdida de Gobernanza	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Aumento de la delincuencia	Social	Gobernanza	ExP	No Aplica	No Aplica
Escasez de mano de obra para sectores económicos diferentes al minero-energético	Social	Economía	ExP	No Aplica	No Aplica
Generación de empleo en áreas rurales	Social	Economía	ExP	No Aplica	No Aplica
Incremento en los precios de bienes y servicios	Social	Economía	ExP	No Aplica	No Aplica
Defectos congénitos en humanos	Social	Demografía	ExP	No Aplica	No Aplica
Citotoxicidad en humanos	Social	Demografía	ExA	No Aplica	No Aplica
Degradación del paisaje	Social	Paisaje	ExP	Estética	Disfrute del Paisaje

Descripción	Dimensión	Factor	Tipo	FERI	SERI
Muy recuperable, poca relación con NB	Medianamente recuperable, mediana relación con NB	Poco recuperable, mediana relación con NB	Medianamente recuperable, alta relación con NB	Poco recuperable, alta relación con NB	



Anexo 6. Acciones susceptibles a producir impactos

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
Adquisición de predios	A	Conflictos de uso del suelo	Social	Gobernanza
		Desarraigo cultural y social	Social	Gobernanza
		Percepción social de inequidad económica	Social	Gobernanza
		Conflictos sociales	Social	Gobernanza
		Pérdida de Gobernanza	Social	Gobernanza
Contratación de mano de obra no calificada	O	Desarraigo cultural y social	Social	Gobernanza
		Escasez de mano de obra para sectores económicos diferentes al minero-energético	Social	Economía
		Percepción social de inequidad económica	Social	Gobernanza
		Percepción social de disminución de la calidad de vida	Social	Gobernanza
		Pérdida de Gobernanza	Social	Gobernanza
		Generación de empleo en áreas rurales	Social	Economía
		Aumento de la delincuencia	Social	Seguridad
Descapote	R	Erosión	Físico	Propiedades físicas del suelo
		Fragmentación de hábitat	Biótico	Conectividad ecológica

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
Construcción de infraestructura para la extracción y almacenamiento de hidrocarburos	C	Contaminación de aguas superficiales con sólidos suspendidos	Físico	Calidad química del agua
		Erosión	Físico	Propiedades físicas del suelo
		Contaminación atmosférica con material particulado	Físico	Calidad del aire
		Acumulación de sedimentos en los cuerpos de aguas superficiales	Físico	Calidad química del agua
		Fragmentación de hábitat	Biótico	Conectividad ecológica
		Efecto borde	Biótico	Ecosistemas terrestres
		Pérdida de hábitat	Biótico	Biodiversidad
		Cambios en los patrones de migración de la fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad
Captación de agua	E	Aumento del estrés hídrico durante sequías	Físico	Oferta hídrica
		Disminución en la presión de los acuíferos	Físico	Oferta hídrica
		Conflictos de uso del agua	Social	Gobernanza
Transporte de líquidos	T	Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con sólidos disueltos	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con metales pesados	Físico	Calidad química del agua
		Aumento en la salinidad de las aguas superficiales	Físico	Calidad química del agua
		Aumento en la salinidad de las aguas subterráneas	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con hidrocarburos aromáticos poli cíclicos	Físico	Calidad química del agua

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
		Contaminación cuerpos de aguas superficiales con sólidos suspendidos	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad química del agua
		Alteración en los ciclos biogeoquímicos	Físico	Ciclos biogeoquímicos
		Acumulación de compuestos radioactivos en el suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo
		Contaminación atmosférica con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad del aire
		Contaminación atmosférica con óxidos de nitrógeno	Físico	Calidad del aire
		Contaminación atmosférica con material particulado	Físico	Calidad del aire
		Contaminación atmosférica con óxidos de azufre	Físico	Calidad del aire
		Cambios en el pH de las aguas superficiales	Físico	Propiedades físicas del agua
		Acumulación de biocidas en el suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo
		Salinización del suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo
		Cambios en el pH del suelo	Físico	Propiedades físicas del suelo
		Pérdida de diversidad microbiológica en cuerpos de aguas superficiales	Biótico	Biodiversidad
		Disrupción endocrina en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
		Bioacumulación y biomagnificación de sustancias tóxicas en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Toxicidad por vía oral o respiratoria en mamíferos	Biótico	Mamíferos
		Alteración metabólica en mamíferos	Biótico	Mamíferos
		Mortalidad y morbilidad en ganado	Biótico	Mamíferos
		Alteración en la actividad enzimática de los peces	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Toxicidad en organismos acuáticos	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Disminución en la reproductividad de invertebrados acuáticos	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Citotoxicidad en humanos	Social	Demografía
		Defectos congénitos en humanos	Social	Demografía
Inyección de la mezcla fracturante	I	Aumento en la salinidad de las aguas subterráneas	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de acuíferos con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de acuíferos con metano	Físico	Calidad química del agua
		Disminución en la presión de los acuíferos	Físico	Oferta hídrica
		Cambio en el pH de las aguas subterráneas	Físico	Propiedades físicas del agua
		Sismicidad inducida	Físico	Geotecnia
		Citotoxicidad en humanos	Social	Demografía
		Defectos congénitos en humanos	Social	Demografía
Extracción de hidrocarburos	P	Alteración en los ciclos biogeoquímicos	Físico	Ciclos biogeoquímicos
		Contaminación acústica	Físico	Calidad del aire

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
		Contaminación atmosférica con óxidos de azufre	Físico	Calidad el aire
		Contaminación atmosférica con óxidos de nitrógeno	Físico	Calidad del aire
		Contaminación atmosférica con material particulado	Físico	Calidad del aire
		Contaminación atmosférica con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad del aire
		Disminución de la población de fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad
		Cambios en los patrones de distribución de la fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad
		Efecto borde	Biótico	Ecosistemas terrestres
		Pérdida de hábitat	Biótico	Biodiversidad
		Cambios en los patrones de migración de la fauna silvestre	Biótico	Biodiversidad
Disposición de las aguas residuales	V	Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con sólidos disueltos	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con metales pesados	Físico	Calidad química del agua
		Aumento en la salinidad de las aguas superficiales	Físico	Calidad química del agua
		Aumento en la salinidad de las aguas subterráneas	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de cuerpos de aguas superficiales con hidrocarburos aromáticos poli cíclicos	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de acuíferos con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad química del agua
		Contaminación de acuíferos con metano	Físico	Calidad química del agua

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
		Acumulación de compuestos radioactivos en el suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo
		Contaminación de aguas superficiales con compuestos orgánicos volátiles	Físico	Calidad química del agua
		Alteración en los ciclos biogeoquímicos	Físico	Ciclos biogeoquímicos
		Disminución de los niveles de oxígeno disuelto en el agua	Físico	Propiedades físicas del agua
		Acumulación de biocidas en el suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo
		Salinización del suelo	Físico	Propiedades químicas del suelo
		Cambios en el pH de las aguas superficiales	Físico	Propiedades físicas del agua
		Cambios en el pH de las aguas subterráneas	Físico	Propiedades físicas del agua
		Cambios en el pH del suelo	Físico	Propiedades físicas del suelo
		Contaminación atmosférica con material particulado	Físico	Calidad del aire
		Contaminación atmosférica con óxidos de nitrógeno	Físico	Calidad del aire
		Sismicidad Inducida	Físico	Geotecnia
		Alteración en la actividad enzimática de los peces	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Lesiones branquiales en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Pérdida de diversidad microbiológica en cuerpos de aguas superficiales	Biótico	Biodiversidad
		Disrupción endocrina en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Toxicidad en organismos acuáticos	Biótico	Fauna dulceacuícola

Acción	ID Categoría	Impacto	Dimensión	Factor
		Alteración de las redes tróficas acuáticas	Biótico	Ecosistemas acuáticos
		Bioacumulación y biomagnificación de sustancias tóxicas en peces	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Alteración metabólica en mamíferos	Biótico	Mamíferos
		Toxicidad por vía oral o respiratoria en mamíferos	Biótico	Mamíferos
		Mortalidad y morbilidad en ganado	Biótico	Mamíferos
		Disminución en la reproductividad de invertebrados acuáticos	Biótico	Fauna dulceacuícola
		Citotoxicidad en humanos	Social	Demografía
		Defectos congénitos en humanos	Social	Demografía
Desmantelamiento	D	Contaminación atmosférica con metano	Físico	Calidad del aire

