

# Estudio dinámico sistémico de los efectos Ambientales del Fracking en Colombia

Gabriel Velandia Higuera  
Director: Dr.  
Jorge Andrick Parra Valencia

Universidad Autónoma de Bucaramanga

Ingeniería de Sistemas  
Dinámica de sistemas  
**Santander-Bucaramanga**

2020

## Tabla de contenidos

1. <b>Resumen</b> .....	4
2. <b>Planteamiento del problema</b> .....	5
2.1 Árbol de problemas .....	6
3. <b>Objetivos</b> .....	6
3.1 Objetivo general .....	6
3.2 Objetivos específicos .....	7
4. <b>Solución presentada</b> .....	7
5. <b>Revisión de la literatura</b> .....	8
6. <b>Marco conceptual</b> .....	10
6.1 ¿Qué es el fracking? .....	11
6.2 Modelación numérica .....	18
6.3 Dinámica de sistemas .....	18
6.4 Diseño metodológico .....	18
7. <b>Resultados obtenidos</b> .....	19
7.1 Un Diseño de hipótesis dinámica que proponga una explicación sobre los efectos ambientales del fracking en Colombia. ....	21
7.2 Un modelo dinámico sistémico orientado al estudio de los efectos ambientales del fracking en colombianos.....	22
7.3 Un documento con un análisis de los Resultados obtenidos. ....	31
7.4 Un Conjunto de Políticas de protección ambiental con respecto los resultados obtenidos de las simulaciones.....	32
7.5 Un documento con una análisis y evaluación de las políticas planteadas mediante la evaluación por simulación de escenarios.....	41
8. <b>Conclusiones</b> .....	42
9. <b>Referencias</b> .....	43

figura 1	Árbol de problemas, fuente: propia.....	6
figura 2	Estres del agua por fracking a escalaglobal.....	16
Figura 3	Consumo de agua para desarrollar fracking.....	21
Figura 4	Documentación.....	22
Figura 5	Documentación.....	23
Figura 6	Documentación.....	23
Figura 7	Documentación.....	24
Figura 8	Diagrama conceptual.....	26
figura 9	Grupo 1.....	27
f igura 10	Grupo 2.....	27
figura 11	Grupo 3.....	28
figura 12	Grupo 4.....	29
figura 13	Modelo dinámico .....	30
figura 14	Resultado 1.....	32
figura 15	Resultado 2.....	32
figura 16	Resultado 3.....	35
figura 17	Resultado 4.....	36
figura 18	pirámide PML.....	37
figura 19	Reutilización en modelo.....	40
figura 20	Resultados de la reutilización.....	41
figura 21	demanda de recurso hídrico.....	42

## **1. Resumen**

El fracking es un método de extracción de gas y petróleo que consiste en someter a una fuerte tensión el subsuelo de zonas en las que no hay yacimientos para fracturar las rocas y obtener el combustible. Pero las consecuencias que tiene para el medio ambiente han catalogado esta técnica como peligrosa.

Uno de los países que produce más petróleo en el mundo es Estados Unidos con 13 millones de barriles al día, disminuyendo así el precio de este. Básicamente están comprando menos para así producir más, gracias al fracking. Por parte de Colombia el panorama cambia ya que la geología es diferente y no es la misma a la de EEUU, mientras que las reservas de aguas estadounidenses no pasan los 400 metros de profundidad, en Colombia ya extraemos agua potable a 1500 metros de profundidad, en resumen, tenemos pozos subterráneos muchos más profundos, por lo tanto, la posibilidad de un mal consumo de agua no reutilizable es visto como problema mayor junto con la baja comprensión de este tema en Colombia. (TIEMPO, 2018)

Con este modelo dinámico se pretende analizar los efectos ambientales que puede causar el fracking en el uso del recurso hídrico en nuestro país. Por medio de simulación dinámica, ciclos y análisis de factores. Así mismo se concluirá con un análisis y unas políticas de protección ambiental en base a los resultados de la simulación dinámica.

### **Palabras claves:**

Fracking  
yacimiento no convencional  
agua  
recursos  
petróleo  
dinámico  
sistémico  
simulación.  
Recurso hídrico

Area: Dinámica de sistemas

## **2. Planteamiento del problema**

En razón a la creciente demanda energética a nivel mundial y su evidente dependencia de los combustibles fósiles, la disminución de las reservas mundiales de crudos convencionales se hace cada vez más palpable; trayendo consigo la ineludible necesidad de hallar nuevas reservas en lugares donde antes no se desplegaban prácticas de exploración y explotación de hidrocarburos. Prácticas que no solamente van dirigidas a la obtención de recursos no renovables convencionales, si no que han trascendido al campo de los yacimientos no convencionales, en los cuales se requiere la utilización de grandes cantidades de agua para la extracción de dichos recursos. ( Marín, E. H. )

Uno de los países que produce más petróleo en el mundo es Estados Unidos con 13 millones de barriles al día, disminuyendo así el precio de este, compran menos para así producir más. mientras que las reservas de aguas estadounidenses no pasan los 400 metros de profundidad por parte de Colombia el panorama cambia ya que la geología es diferente y no es la misma a la de EEUU, en Colombia ya extraemos agua potable a 1500 metros de profundidad, en resumen, tenemos pozos subterráneos muchos más profundos, por lo tanto, la posibilidad de daño de contaminación es mucho más amplia y la cantidad de fluido disponible puede incrementar, también el consumo de agua no reutilizable es visto como problema mayor junto con la baja comprensión de este tema en Colombia. (TIEMPO, 2018)

## 2.1 Árbol de problemas

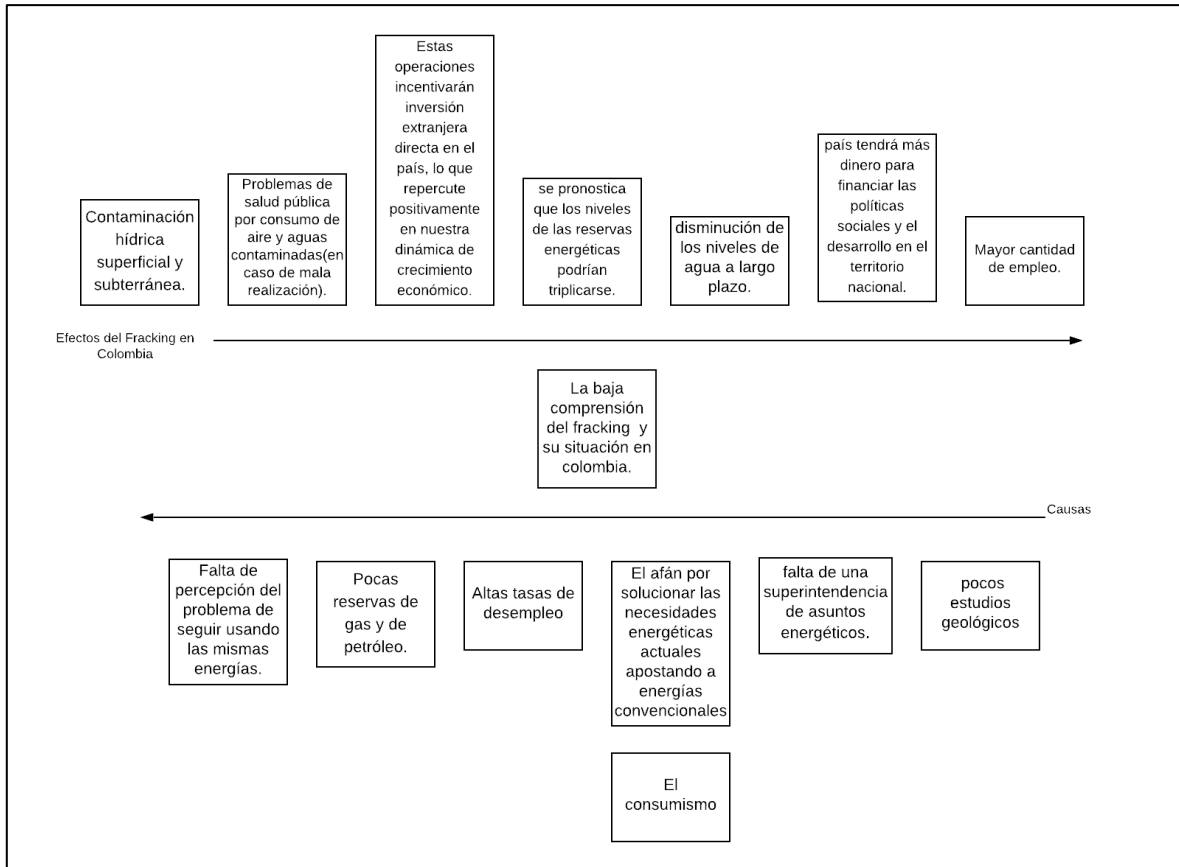


figura 1 Árbol de problemas, fuente: propia.

## 3. Objetivos

### 3.1 Objetivo general

Diseñar un modelo en dinámica de sistemas que contribuya a mejorar la comprensión de los efectos ambientales del fracking en Colombia.

### 3.2 Objetivos específicos

- Diseñar hipótesis una dinámica que proponga una explicación sobre los efectos ambientales del fracking en suelos colombianos.

- Diseñar un modelo dinámico sistémico orientado al estudio de los efectos ambientales del fracking en Colombia.
- Evaluar mediante simulación dinámica los resultados del modelo dinámico sistémico.
- Proponer políticas de protección ambiental con respecto a los resultados obtenidos de las simulaciones.
- Evaluar las políticas de protección ambiental propuestas mediante la evaluación por simulación de escenarios.

#### **4. Solución presentada**

Se presenta un modelo dinámico sistémico con el que se pretende analizar los efectos ambientales que puede causar el fracking con su uso del recurso hídrico en nuestro país. Por medio de simulación dinámica, ciclos y análisis de factores. Así mismo se concluirá con un análisis y unas políticas de protección ambiental en base a los resultados de la simulación dinámica.

#### **5. Revisión de la literatura**

<b>1. Título</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RIESGOS OPERACIONALES Y AMBIENTALES DEL FRACKING EN LOS ESTADOS UNIDOS. (LÓPEZ, 2018)</b>
<i>Problema</i>	Se ha acalorado el debate de las organizaciones sociales que han documentado los graves problemas que esta técnica causa sobre el medio y que repercuten directamente sobre la salud de las personas. Por otra parte, están las compañías petroleras y los gobiernos, que estimulan el uso de esta técnica para aumentar las reservas petroleras que se encuentran diezmadas y que amenazan la economía del país.
<i>Método</i>	Investigación
<i>Resultado</i>	Una monografía que trata sobre el fracturamiento hidráulico, más comúnmente conocido como fracking, que se emplea para extraer hidrocarburos de una forma no convencional.

<b>2. Título</b>	<b>EFFECTOS DE LA ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA (FRACKING) EN EL RECURSO HÍDRICO: IMPLICACIONES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO. (Sharel CharryOcampo, 2017)</b>
<i>Problema</i>	La contribución de la extracción de gas lutita en la sostenibilidad energética ha sido evaluada de manera independiente, sin tener en cuenta su relación con la seguridad hídrica ni sus impactos en las fuentes de agua.
<i>Método</i>	Investigación
<i>Resultado</i>	Se realizó un análisis de estos impactos a través de una revisión bibliográfica de carácter nacional e internacional. Si bien el análisis hecho sugiere un aspecto fundamentalmente importante: impactos en el recurso hídrico asociados a la cantidad y calidad de este.
<b>3. Título</b>	<b>IMPACTOS AMBIENTALES DEL FRACKING ANALIZADO DESDE LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL DE ESTADOS UNIDOS. (Agudelo, 2016)</b>
<i>Problema</i>	Estados Unidos es uno de los países que actualmente utiliza este método de manera frecuente, en los últimos años diversos estudios han arrojado informes sobre las consecuencias ambientales que ha representado dicha explotación, pero realmente ha sido preponderante que sea mantenida la extracción por encima de las consecuencias ambientales que esta pueda tener.
<i>Método</i>	Investigación
<i>Resultado</i>	Una investigación acerca de los impactos ambientales del fracking a la estructura hídrica estadounidense.
<b>4. Título</b>	<b>ANALYSING COMPLEX BEHAVIOUR OF HYDROLOGICAL SYSTEMS THROUGH A SYSTEM DYNAMICS APPROACH</b>
<i>Problema</i>	La interacción entre los diversos componentes del ciclo del agua consiste en procesos biofísicos complejos, no lineales y bidireccionales (interdependientes) que pueden interpretarse mediante bucles de retroalimentación en un entorno de dinámica de sistemas (SD).
<i>Método</i>	Dinámica de sistemas



<i>Resultado</i>	Se demuestra la aplicación del enfoque de la DDS con dos estudios de casos que utilizan una herramienta de software especializada, Vensim.
<b>5. Título</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RIESGOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES DESDE UN CONTEXTO INTERNACIONAL Y SU APLICACIÓN EN COLOMBIA</b>
<i>Problema</i>	El estudio de los riesgos ambientales y sus posibles actividades de mitigación comparado con lo que se ha reglamentado en Colombia, evidencia la falta de profundidad e importancia que se ha dado a los riesgos ambientales y sociales asociados a la exploración de yacimientos no convencionales en el país
<i>Método</i>	Investigación
<i>Resultado</i>	Una comparación de los resultados obtenidos con la normatividad que Colombia ha implementado para el desarrollo de este tipo de yacimientos y una evaluación de la aplicabilidad de las experiencias internacionales al ámbito nacional.
<b>6. Título</b>	<b>RIESGOS Y POSIBLES AFECTACIONES AMBIENTALES AL EMPLEAR LA TÉCNICA DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS EN YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES EN COLOMBIA</b>
<i>Problema</i>	Potenciales impactos y riesgos ambientales de las actividades relacionadas con la técnica del fracturamiento hidráulico (fracking), específicamente sobre el recurso hídrico,
<i>Método</i>	Investigación
<i>Resultado</i>	Se presenta un análisis identificando todos los posibles daños o impactos en la estructura colombiana.
<b>7. Título</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE LOS POSIBLES IMPACTOS AMBIENTALES POR EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO (FRACKING) DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES</b>

<i>Problema</i>	El fracking podría causar daños ambientales de mayor impacto, ya que el país no tiene una línea base que ofrezca conocimiento sobre la hidrogeología, neotectónica, tectónica activa, geología detallada a nivel local, identificación y caracterización de ecosistemas, de las áreas a ser intervenidas para la explotación de Hidrocarburos No Convencionales mediante la técnica del fracking.
<i>Método</i>	Investigación
<i>Resultado</i>	Un análisis detallado de posibles impactos del fracking en el panorama colombiano.
<b>8. Título</b>	MODELING GROUNDWATER FLOW AND POLLUTION
<i>Problema</i>	En muchas partes del mundo, con el aumento de la extracción de aguas subterráneas, a menudo más allá de los límites permisibles, la calidad de las aguas subterráneas se ha ido deteriorando continuamente, lo que causa mucha preocupación tanto a los proveedores como a los usuarios.
<i>Método</i>	Dinámica de sistemas
<i>Resultado</i>	el objetivo de este capítulo es sentar las bases del procedimiento y la metodología de modelado de acuíferos y su contaminación

## 6. Marco conceptual

Del petróleo se dice que es el energético más importante en la historia de la humanidad; un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo. (Esper)

Aunque se conoce de su existencia y utilización desde épocas milenarias, la historia del petróleo como elemento vital y factor estratégico de desarrollo es relativamente reciente, de menos de 200 años.

En 1850 Samuel Kier, un boticario de Pittsburg, Pennsylvania (EE.UU.), lo comercializó por vez primera bajo el nombre de "aceite de roca" o "petróleo". A partir de entonces se puede decir que comenzó el desarrollo de la industria del petróleo y el verdadero aprovechamiento de un recurso que indudablemente ha contribuido a

la formación del mundo actual. La alta dependencia que el mundo tiene del petróleo y la inestabilidad que caracteriza el mercado internacional y los precios de este producto, han llevado a que se investiguen energéticos alternativos sin que hasta el momento se haya logrado una opción que realmente lo sustituya, aunque se han dado importantes pasos en ese sentido. (Esper)

A los otros países productores se les denomina "independientes" y entre los principales se encuentran el Reino Unido, Noruega, México, Rusia y Estados Unidos. Este último es el mayor consumidor de petróleo, pero al mismo tiempo es uno de los grandes productores.

Colombia forma parte de este grupo de naciones, aunque su participación se considera "marginal" tanto en reservas como en producción y volúmenes de exportación. No es, por consiguiente, un país petrolero.

El petróleo es uno de los más importantes productos que se negocian en el mercado mundial de materias primas. Las bolsas de Nueva York (NIMEX) y de Londres (IPC) son los principales centros donde se transa, pero también tiene un mercado "spot" o al momento. Los precios se regulan por unos marcadores o "precios de referencia", entre los que sobresalen el WTI, Bren, Dubai. (Esper)

El petróleo contiene tal diversidad de componentes que difícilmente se encuentran dos tipos idénticos.

Los principales usos del petróleo son:

- Como combustible doméstico e industrial.
- Como carburante y lubricante.
- Como materia prima básica en la industria petroquímica.

El tiempo avanza y con él avanzaron las nuevas técnicas de extracción de petróleo, viendo la necesidad de extraer petróleo de sitios sin yacimientos, nació la explotación de yacimientos no convencionales o también llamado fracking. Para entrar en el contexto es importante conocer claramente el término "Fracking".

### **6.1 ¿Qué es el fracking?**

La fracturación hidráulica ha evolucionado con el pasar del tiempo, "anteriormente consistía en perforar un pozo vertical hasta los esquistos y luego inyectar una mezcla de agua y otros productos químicos a alta presión para que el gas se libere de la roca. Hoy en día, la nueva técnica de fracturación llamada direccional permite excavar un pozo a una profundidad significativa no solo verticalmente sino también horizontalmente, es decir paralelamente a la superficie". (Mooney, 2011, p. 83).

la Escuela Forestal y de Estudios Ambientales de la Universidad de Yale establece que el fracking es:

“La fractura hidráulica (fracking) es una técnica de extracción de hidrocarburos no convencionales como el petróleo y el gas, que de otra manera serían imposibles de extraer. En el principio de los años 2.000, las compañías de energía comenzaron combinando la perforación horizontal con la fractura hidráulica para la extracción de estos recursos. El proceso implica la perforación horizontal a través de una capa de roca y la inyección de una mezcla presurizada de agua, arena, y otros productos químicos en las fracturas de la roca y facilita el flujo de petróleo y de gas.”

Andrés Ángel, asesor científico de la Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA), explica que el fracking es una técnica de extracción de hidrocarburos que consiste en la inyección de grandes volúmenes de fluidos a presión para generar fracturas en rocas y así crear vías de migración de los hidrocarburos hacia la superficie. (Venegas)

Por su parte, Óscar Vanegas, ingeniero de petróleos y docente de la Universidad Industrial de Santander (UIS), aclara que el “fracking” (o fracturación hidráulica, en español) se ha utilizado desde 1947 para la extracción de hidrocarburos. Es decir, en varios casos el petróleo que utilizamos se ha extraído a través de la fracturación hidráulica de areniscas o calizas, que se conocen como yacimientos convencionales. (Cruz, 2018)

Según Angel Vanegas, el fracturamiento hidráulico convencional comenzó en Kansas (Estados Unidos) en 1947. El no convencional, aunque estaba patentado desde 1865, comenzó a utilizarse en el año 2000, en Pensilvania (también en

Estados Unidos). “Antes, el precio del petróleo convencional no daba para meterse en esto, las tensiones geopolíticas no lo justificaban”, dice Ángel. Según el científico, no existían las tecnologías que lo hicieran rentable. (Venegas)

Sin embargo, lo que ha generado grandes debates durante los últimos años es, en particular, la fracturación hidráulica de lutitas (las rocas madre donde se origina el petróleo y el gas). Estos son los llamados “yacimientos no convencionales”. La extracción de hidrocarburos en estos yacimientos no convencionales es a lo que actualmente se denomina “fracking” en los debates en medios nacionales e incluso dentro del gabinete del presidente Iván Duque. (Luisa Fernanda Gómez Cruz)

### **Explotación de yacimientos no convencionales**

Como lo expone la Asociación Colombiana de Petróleos (ACP), en el artículo

“Yacimientos no convencionales: el nuevo boom” publicado en la Revista ACP, “ante las predicciones sobre la posible escasez de los hidrocarburos convencionales en menos de 40 años, los reservorios no convencionales han empezado a cobrar mayor importancia en el mercado energético a nivel mundial”. En la misma publicación mencionan que para la National Intelligence Council los hidrocarburos de yacimientos no convencionales se presentan como un factor clave para mantener y aumentar las reservas de hidrocarburos del mundo y preservar el mercado energético. (PETRÓLEO, 2012) las reservas son aquellas cantidades de hidrocarburos que pueden ser recuperadas comercialmente de acumulaciones conocidas a una fecha dada, constituyendo tan sólo la parte recuperable y explotable de los recursos de hidrocarburos en un tiempo determinado. Algunas de las partes no recuperables del volumen original de hidrocarburos pueden ser consideradas como reservas, dependiendo de las condiciones económicas, tecnológicas, o de otra índole, que lleguen a convertirlas en volúmenes recuperables. (BARANDIARAN, 2011) Como Etherington lo menciona, “un reservorio no convencional es aquel que no puede ser producido a tasas económicas sin ayuda de tratamientos de estimulación masiva o de procesos especiales de recuperación”. Definido de forma más amplia, los recursos no convencionales son aquellos que están contenidos en reservorios de baja permeabilidad o que poseen petróleo pesado o de alta viscosidad, y que requieren tecnologías avanzadas de perforación o estimulación, a fin de lograr la producción a tasas de flujo comerciales. (ETHERINGTON, 2005)

### **¿Cuáles son los beneficios?**

Según la asociación colombiana del petróleo ACP, El fracking está rodeado de mitos, pero en realidad se destaca por sus casos de éxito. Según economistas y analistas, la exploración y explotación de Yacimientos No Convencionales sería fundamental para incrementar las reservas energéticas de Colombia. Esto sería vital para asegurar nuestra sostenibilidad energética y promover el desarrollo social y económico. (ACP, s.f.)

Beneficios para Colombia:

- Estas operaciones incentivarán inversión extranjera directa en el país, lo que repercute positivamente en nuestra dinámica de crecimiento económico.
- A medida que la exploración confirme el potencial que tendría Colombia, se pronostica que los niveles de las reservas energéticas podrían triplicarse.
- Una mayor producción de petróleo significa que el país tendrá más dinero para financiar las políticas sociales y el desarrollo en el territorio nacional.
- Se podría asegurar la autosuficiencia energética del país por varios años más.
- Consolidación del perfil de Colombia como exportador energético.

## ¿Cómo funciona?

El proceso de la fracturación enunciado por (AGUIRRE) consta de los seis pasos enunciados a continuación:

- Plataforma de perforación
- Proceso de perforación vertical.
- Perforación horizontal del yacimiento.
- Fase de terminación.
- Liberación de los recursos no convencionales (petróleo y gas).
- Producción del recurso

Descrito de manera más detallada por Urresti y Marcellesi, a diferencia de los yacimientos convencionales, en donde los pozos son perforados verticalmente, en los yacimientos no convencionales se inicia la perforación de los pozos de manera vertical, pero al alcanzar la capa que contiene el recurso se desvía la trayectoria de perforación para penetrar a lo largo de la formación toda la longitud posible. En la siguiente imagen se presenta un ejemplo de las técnicas de perforación para la extracción de gas de un yacimiento convencional y un yacimiento no convencional, respectivamente. (Aitor Urresti González, 2012)

Al terminar con la perforación horizontal, se aíslan tramos del pozo desviado y se envían cargas explosivas para perforar la tubería y luego poder inyectar el agua a alta presión junto con los aditivos y químicos. El objetivo de esta fracturación es generar nuevas fracturas en la formación y ampliar las existentes. Este proceso se puede llegar a realizar hasta 15 veces por cada uno de los tramos para lograr los objetivos trazados en cada uno de ellos. Uno de los aditivos comúnmente utilizados es la arena, la cual queda atrapada en las grietas de la formación, apuntalándolas e impidiendo que se cierren una vez retirada la presión ejercida. (LAURA MARGARITA ROMERO FUENTES, 2016)

Como lo mencionan Urresti y Marcellesi, al subsuelo son bombeadas hasta 500 sustancias, entre las cuales 17 son tóxicas para organismos acuáticos, 38 son tóxicos agudos, 8 son cancerígenos probados, 7 son elementos mutagénicos. Entre otros destaca la presencia de ácidos, antioxidantes, biocidas, bencenos, xilenos, disulfuros de carbono y compuestos de piridina. Por lo anterior, se considera que la composición exacta del fluido utilizado en el fracking es desconocida y está exenta de políticas medioambientales en muchos países al ser parte del secreto empresarial de las empresas encargadas de esta operación. (Aitor Urresti González, 2012)

Por otro lado, en cada perforación realizada, son necesarios alrededor de 200.000 m<sup>3</sup> de agua para llevar a cabo la fracturación hidráulica y sabiendo que,

aproximadamente, los aditivos equivalen al 2% del agua bombeada, se están inyectando cerca de 4.000 toneladas de productos químicos altamente contaminantes. Gran parte de este fluido inyectado retorna posteriormente a superficie, así como también, el fluido que no retorne, se puede quedar en el subsuelo y migrar hacia un acuífero o fuente hídrica superficial (FUENTES, 2016)

### **¿Qué químicos se utilizan para la fracturación de las rocas?**

En países como el Reino Unido y España, las compañías están obligadas a divulgar la lista de aditivos químicos que utilizan.

En Estados Unidos, en cambio, cada estado decide si las empresas deben hacer pública esa información, aunque la industria estableció una base de datos de carácter voluntario en el sitio Fracfocus. Uno de los principales problemas apuntados por los críticos es qué sucede con las llamadas aguas residuales. (Martins, 2013)

Una vez que comienza a fluir el gas, entre el 25% y el 75% del fluido de fracturación con aditivos que fue inyectado a alta presión vuelve a la superficie, según señaló el año pasado en su informe sobre fracking la Royal Society.

Uno de los problemas más delicados es cómo almacenar o disponer de esas aguas residuales, también llamadas aguas de reflujó.

"La toxicidad potencial de las aguas residuales es difícil de evaluar debido a que muchos aditivos químicos usados en el fluido de fracturación hidráulica son secreto comercial no divulgado", dijo a BBC Mundo Trevor Penning, jefe del centro de toxicología de la Universidad de Pensilvania. (Penning, 2013)

Vanegas explica que cada empresa fabricante de esos químicos le da su nombre al producto que vende, pero que en términos genéricos las sustancias que se utilizan para que sea más fácil fracturar la roca son reductores de viscosidad, inhibidores de precipitación de escamas, viscosificantes, inhibidores de corrosión, estabilizadores de pH y fluidos pisotrópicos que permitan el flujo a través de las fracturas. (Venegas)

Adicionalmente, la Alianza Mexicana Contra el Fracking, compiló los que para su caso son los principales "impactos socio ambientales del uso de la fracturación hidráulica", que incluye los siguientes:

- Disminución de disponibilidad del agua: La fracturación de un solo pozo requiere entre nueve y 29 millones de litros de agua. El ritmo de explotación anual de 9,000 nuevos pozos en Estados Unidos que se pretende exportar a México supondría un volumen de agua equivalente al necesario para cubrir

el consumo doméstico (100lts/pers/día) de entre 1,8 y 7,2 millones de personas en un año.

- Emisión de gases y su contribución al calentamiento global: 90% de las emisiones en el proceso de obtención del gas es metano, aunque también se emite dióxido de azufre, óxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Aunque la quema del gas natural emite menos dióxido de carbono que otros hidrocarburos, el proceso completo de su explotación contribuye en mayor medida a la aceleración del cambio climático debido a las fugas de metano producidas durante su extracción.

### ¿Gasto del recurso hídrico?

Se dice que el volumen de agua utilizado en fractura hidráulica depende del tamaño de pozo, pero se calcula que oscila entre los 10 y 15 millones de litros, es decir, 10 veces más agua que en el modo convencional de extracción.

En un artículo en la revista AGU Earth's Future, Lorenzo Rosa y compañeros evaluaron los impactos de la fracturación hidráulica en la disponibilidad local para la producción de alimentos, otras necesidades humanas y ambientales a nivel mundial.

El siguiente mapa muestra el estrés hídrico en los depósitos de lutitas. En las zonas con escasez de agua, el agua se consume a un ritmo mayor que el suministro de agua local se repone. Los píxeles verdes, amarillos, naranjas o rojos representan áreas donde hay depósitos de esquisto bituminoso y donde el agua dulce ya se usa a tasas insostenibles. Las áreas con índices de estrés hídrico mayores de uno son donde el consumo de agua para actividades humanas es insostenible. (Francisco Martín León 2018)

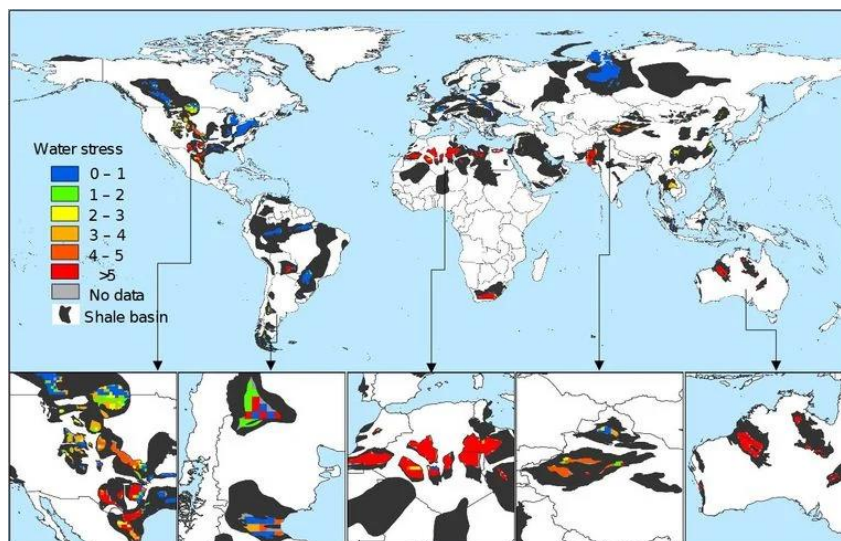


Figura 2 Estrés del agua por fracking a escala global. Fuente: Rosa, et al. (2018)



Se descubrió que el 30% de los depósitos de esquistos están ubicados en regiones áridas donde los acuíferos ya están siendo explotados para irrigar cultivos y entre el 31% y el 40% de los depósitos de esquisto se encuentran en áreas donde emergerá el estrés hídrico o se agravará por el fracking.

Los investigadores terminan que en aquellos lugares se necesitarían planes de gestión del agua para garantizar que el fracking no afecte a otras necesidades humanas y ambientales del agua.

### **6.2 Modelación numérica**

Durante el desarrollo de las actividades de exploración y explotación de gas de lutita se han realizado algunos estudios que usan modelos conceptuales y numéricos en diferentes perspectivas. Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos en modelación numérica en el contexto de la explotación de gas de lutita han sido enfocados en la optimización de las fases de producción. Estos estudios incluyen datos como madurez térmica, contenido orgánico, comportamiento del flujo darciano de agua y gas en los reservorios, cambios de presiones, litología, saturación de fluidos, regímenes de tensión, entre otros. (Sharel Charry-Ocampo)

Myres realizó un análisis y una caracterización de los factores asociados al transporte de contaminantes en las lutitas hacia los acuíferos cercanos a través de vías naturales, considerando los tiempos de desplazamiento de los contaminantes, las vías posibles de transporte y parámetros hidrogeológicos locales. Como conclusión de este estudio, las simulaciones sugieren que el tiempo de transporte de contaminantes podría verse disminuido en las escalas de tiempo geológico, así como el flujo preferencial a través de las fracturas naturales también podría disminuir aún más los tiempos de transporte de contaminantes por pocos años. (Myres) (Sharel Charry-Ocampo).

### **6.3 Dinámica de sistemas**

La Dinámica de Sistemas es una metodología para el estudio y manejo de sistemas de realimentación complejos. Una de las características de esta disciplina es el uso del computador para realizar sus simulaciones, lo que ofrece la posibilidad de estudiar el comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de los elementos de un sistema a través del tiempo. Esto la hace muy útil para el estudio de fenómenos sociales ya que en ellos están implicados una gran cantidad de elementos e interrelaciones en los que las presencias de no linealidades determinan el comportamiento y dificultan una solución analítica. Además, los efectos de las políticas y acciones ejercidas sobre estos sistemas se manifiestan en

horizontes temporales diferentes y dilatados. Este hecho dificulta la construcción de laboratorios de experimentación donde se puedan probar diferentes políticas y observar sus consecuencias sobre el sistema. Por tanto, los modelos de simulación dinámica permiten estudiar cómo las políticas, decisiones, estructura y retrasos influyen en el crecimiento y la estabilidad de un sistema. Actualmente su ámbito de aplicación abarca la planificación y diseño de políticas corporativas, la gestión y las políticas públicas, los modelos biológicos y médicos, el área de la energía y el medio ambiente, el desarrollo de la teoría en ciencias naturales y sociales, la toma de decisiones y la dinámica no lineal compleja. (Catalina, 2010)

Esta metodología permite:

- Identificar el problema.
- Desarrollar hipótesis dinámicas que explican las causas del problema.
- Construir un modelo de simulación del sistema que permita analizar la raíz del problema.
- Verificar que el modelo reproduce de forma satisfactoria el comportamiento observado en la realidad.
- Probar en el modelo las diferentes alternativas o políticas que solucionen el problema, e implementar la mejor solución. (dinamica-de-sistemas.com, s.f.)

La intervención del hombre en el medioambiente que lo rodea (y del cual forma parte), provoca indefectiblemente alguna alteración en el ecosistema afectado.

Una de las herramientas más difundidas para la valoración previa de los efectos ambientales de cualquier proyecto antes de su ejecución es la Evaluación de Impacto Ambiental, vigente y de aplicación obligatoria en muchos países alrededor del mundo.

Actualmente, el término Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) sirve para referirse a una serie de diferentes actividades, pero surgió y fue institucionalizado en el sentido de prever las consecuencias futuras sobre la calidad ambiental de las decisiones que se toman hoy. (Pérez)

Hay también varias definiciones de impacto ambiental, de la cual es remarcable la de Wathern, 1988, según la cual es “el cambio en un parámetro ambiental, en un determinado período y en una determinada área, que resulta de una actividad dada, comparado con la situación que ocurriría si esa actividad no hubiera sido iniciada”.

Esta definición tiene la particularidad de introducir la dimensión dinámica de los procesos del medioambiente como pilar para el entendimiento de los cambios ambientales.

El modelo puede considerarse como un primer paso para efectuar evaluaciones dinámicas del efecto de una acción del hombre (urbanización, grandes obras de ingeniería, contaminación) sobre un determinado ecosistema.

Las simulaciones con diferentes relaciones de parámetros permiten muy fácilmente observar la evolución del modelo para diferentes condiciones de equilibrio. (Pérez)

#### **6.4 Diseño metodológico**

Para llegar al diseño y simulación de modelos dinámicos contables, se Utilizará el enfoque metodológico proporcionado por la Dinámica de Sistemas, que está constituido por las siguientes etapas:

- Modelo conceptual y límites del sistema: Definición del modelo conceptual (variables internas y externas del sistema, así como relaciones entre éstas) y explicación hipotética de su comportamiento.
- Construcción de la estructura causal del sistema – Diagrama causal: Estructuras de realimentación que suelen producir el comportamiento observado. En el modelo conceptual se definen relaciones entre los elementos fundamentales del sistema a modelar.
- Construcción del diagrama de Forrester: Se clasifican los elementos de acuerdo a la función que desempeñan en el comportamiento dinámico del sistema.
- Modelo Matemático: Es el conjunto de ecuaciones lineales o no lineales que permiten simular en un computador el comportamiento dinámico del fenómeno en estudio, al describir las trayectorias temporales de las variables consideradas. Simulación y experimentación del modelo: Se simula el modelo en el computador para analizar el comportamiento de los elementos más relevantes dentro del fenómeno, a partir de unas condiciones iniciales dadas y unos parámetros determinados por el experto.
- Análisis de sensibilidad: Se define la importancia de los elementos del fenómeno, observando cómo una variación de estos elementos genera un gran cambio en la respuesta del modelo.
- Validación del modelo: “Los modelos construidos con el enfoque de Dinámica de Sistemas, no deben pretender tanto predecir valores exactos en un instante determinado del futuro, como reproducir las características de

comportamiento del sistema...” (Aracil, 1983). La metodología utilizada en la presente investigación se basa en (JULIAO, 2006)

El software en el que se realizara el modelo dinámico sistémico recibe como nombre “VENSIM”. Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. Vensim proporciona una forma simple y flexible de crear modelos de simulación, sean con diagramas causales o con diagramas de flujos. Las relaciones entre los elementos del sistema representan las relaciones causales, que se muestran mediante la conexión de palabras con flechas. Esta información se usa después por el Editor de Ecuaciones para crear el modelo de simulación. Se puede analizar el modelo teniendo en cuenta las causas y el uso de las variables, y también estudiando los ciclos relacionados con una variable. Mientras que se construye un modelo que puede ser simulado, Vensim permite observar el comportamiento del modelo. (dinamica-desistemas.com, s.f.)

La población y objeto de estudio que se tendrá en cuenta para la investigación, corresponde a todos aquellos factores y procesos que intervienen en a la hora de utilizar el recurso hídrico en el territorio, como por ejemplo las cantidades de agua gastadas y reutilizadas.

## **7.0 Resultados obtenidos**

**7.1** Un Diseño de hipótesis dinámica que proponga una explicación sobre los efectos ambientales del fracking en Colombia.

### **Consumo del recurso hídrico**

Uno de los aspectos que genera más polémica en lo relacionado con la estimulación hidráulica tiene que ver con los recursos hídricos, principalmente con el consumo de elevadas cantidades de agua. (J. Matesanz). Esta cantidad de agua puede variar entre 10 y 30 millones de litros por cada pozo o también es válido manejar la relación de dos litros de agua por cada litro de petróleo a obtener.

Teniendo claro el uso del recurso hídrico en el proceso del frackign, se puede pensar ¿qué tanta agua se extrae?, ¿hacia dónde va?, y si su reutilización será efectiva.

Para acceder al gas con la perforación y la fractura hidráulica se requieren entre 7 y 25 millones de litros de agua por pozo, calcula el Instituto de Recursos Mundiales (WRI).

La verdad es que muchos países que tienen reservas de este gas, técnicamente explotables, se enfrentan a una seria escasez de agua. En torno al 38% de las reservas del gas de esquisto están afectadas por estrés hídrico, en alto grado, o se encuentran en territorios áridos.

Los valores de consumo reportados en otros sitios presentan una gran variación, como se puede observar en la Tabla, oscilando entre 3785 y 75708 m<sup>3</sup> por pozo. Las variaciones pueden ser explicadas por las diferencias en la profundidad y la distancia horizontal por recorrer, es decir, por las características propias de cada pozo. (Sharel Charry-Ocampo)

Autor	Año	Consumo recurso hídrico/pozo (m <sup>3</sup> )
Jackson	2014	7570a75708
Brantley <i>et al.</i>	2014	15142 a 18927
Vidic <i>et al.</i>	2013	7570a 26498
Peduzzi & Harding	2013	7570 a 30283
Eaton	2013	7570 a 37854
Rivard <i>et al.</i>	2013	7500 a 15000
Freeman	2013	22712
Myres	2012	17034
Groat y Grimshaw	2012	15142 a 23091
Bocora	2012	18927
Weijermars <i>et al.</i>	2011	4542.5 a 13249
D. Rahm y Jiang <i>et al.</i>	2011-2012	7570.8 a 18927
Harper	2008	15141.6

Figura 3 Consumo de agua para desarrollar fracking

fuentes: Sharel Charry-Ocampo

A pesar de la caída en el precio del petróleo todavía algunos países se plantean la explotación de este recurso aun cuando supone una competencia con el consumo de agua de la población y de otras industrias. Son muchas las personas que habitan en zonas que pueden verse afectadas por las limitaciones del recurso del agua.

Los volúmenes de agua necesarios para generar las fracturas de manera artificial son típicamente provistos por caudales de arroyos, lagos, ríos y fuentes subterráneas. Muchos autores han reportado que esto ha traído como consecuencia la reducción del caudal estacional, la degradación en la calidad del agua regional y la reducción del nivel freático; además, ha generado conflictos ligados a la competencia del recurso con la agricultura, ganadería y suministro de agua potable (P. Peduzzi y R. Hard )( R. Weijermars, G. Drijkoningen) .(R. Weijermars) J. (Soeder,

S. Sharma, N. Pekney)( M. Guarnone, F. Rossi, E. Negri) (M. Ratner y M. Tiemann)  
(Sharel Charry-Ocampo)

El consumo de algunas explotaciones no parecería ser significativo; sin embargo, el crecimiento desmedido de pozos puede poner en riesgo la sostenibilidad del recurso hídrico (J. P. Nicot y B. R. Scanlon) Esto es grave en regiones donde la oferta hídrica es limitada y donde existe competencia con el suministro de agua potable.

Carlos Santiago, líder de la Corporación para la Defensa del Agua, el Territorio y los Ecosistemas, que agrupa a los opositores del fracking en San Martín, afirma que “en Cesar hemos sufrido el desabastecimiento de agua y no queremos que la que queda se utilice para el ‘fracking’. Esa tecnología es muy peligrosa porque le echa un montón de químicos al agua y además puede llegar a contaminar las fuentes hídricas subterráneas”.

Colombia seguirá necesitando hidrocarburos, pero la pregunta es si el fracking es la mejor manera de conseguirlos. Los comprobados impactos negativos de esta técnica, sumados al poco conocimiento del territorio, la debilidad institucional y una opinión pública desfavorable, no permiten pensar en aplicarla sin causar graves daños ambientales y aumentar los conflictos sociales. Por esas razones, el remedio del fracking puede resultar peor que la enfermedad de la escasez petrolera. (revista semana)

## 7.2 Un modelo dinámico sistémico orientado al estudio de los efectos ambientales del fracking en colombianos.

### Documentación

Group	Type	Variable
modelo6	A	agua condensada (m3)
modelo6	F,A	agua en precipitacion (m3)
modelo6	A	agua evaporada (m3)
modelo6	C	agua extraida 1 (m3/Year)
modelo6	C	agua extraida 2 (m3/Year)
modelo6	C	agua extraida 3 (m3/Year)
modelo6	A	agua residual domestica (m3/Year)
modelo6	A	agua residual industrial (m3/Year)
modelo6	A	agua reutilizada (m3)
modelo6	L	agua subterranea (m3)
modelo6	F,A	agua tratada (m3/Year)
modelo6	L	cuerpos de agua (m3)
modelo6	C	distribucion a poblacion (m3/Year)
modelo6	A	domestica (m3/Year)
modelo6	F,A	extraccion 1 (m3/Year)
modelo6	F,A	extraccion 2 (m3/Year)
modelo6	F,A	extraccion 3 (m3/Year)
modelo6	C	extraccion natural (m3/Year)
modelo6	F,A	filtracion (m3/Year)
.Control	C	FINAL TIME (Year)
modelo6	A	industrial (m3/Year)
.Control	C	INITIAL TIME (Year)
modelo6	A	PTAP (m3/Year)
modelo6	A	PTAR (m3/Year)
.Control	A	SAVEPER (Year)
modelo6	L	suministro de agua para fraking (m3)
modelo6	L	tasa de contaminacion de agua subterranea (contaminacion)
modelo6	L	tasa de contaminacion de cuerpos de agua (contaminacion)
modelo6	C,F	tasa de contaminacion de mezcla (contaminacion/Year)
modelo6	C,F	tasa inicial 1 (contaminacion/Year)
modelo6	C,F	tasa inicial (contaminacion/Year)
.Control	C	TIME STEP (Year)

El modelo consta de 32 variables, cada una con unidades entre los metros cuadrado y años. El tiempo es medido o tomado en un lapso de 1000 años.

Figura 4 documentación

Model Information	Result
Total Number Of Variables	32
Total Number Of State Variables	5 (15,6%)
Total Number Of Stocks	5 (15,6%)
Total Number Of Feedback Loops No IVV (Maximum Length: 30).[0, 0]	0 (0 0 0)
Total Number Of Feedback Loops With IVV (Maximum Length: 30).[0, 0]	0 (0 0 0)
Total Number Of Causal Links	31 (24 7 0)
Total Number of Rate-to-rate Links	0
Number Of Units Used In The Model (Basic/Combined)	3/2
Total Number Of Equations Using Macros	0 (0,0%)
Variables With Source Information	0 (0,0%)
Dimensionless Unit Variables	0 (0,0%)
Variables without Predefined Min or Max Values	28 (87,5%)
Function Sensitivity Parameters	0 (0,0%)
Data Lookup Tables	0 (0,0%)
Time Unit	Year
Initial Time	0
Final Time	1000
Reported Time Interval	TIME STEP
Time Step	1
Model Is Fully Formulated	Yes
Model Defined Groups	No

Figura 5 documentación

Warnings	Result
Number Of Undocumented Variables	2 (6,2%)
Equations With Embedded Data	13 (40,6%)
Variables Not In Any View	0 (0,0%)
Nonmonotonic Lookup Functions	0 (0,0%)
Cascading Lookup Functions	0 (0,0%)
Non-Zero End Sloped Lookup Functions	0 (0,0%)
Equations With If Then Else Functions	0 (0,0%)
Equations With Min Or Max Functions	0 (0,0%)
Equations With Step Pulse Or Related Functions	0 (0,0%)
Equations With Unit Errors Or Warnings	1 (3,1%)
Potential Omissions	Result
Unused Variables	9 (28,1%)
Supplementary Variables	0 (0,0%)
Supplementary Variables Being Used	0 (0,0%)
Complex Variable	1 (3,1%)
Complex Stock	1 (3,1%)

Figura 6 documentación

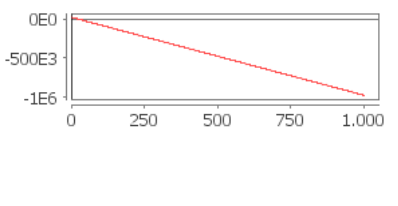
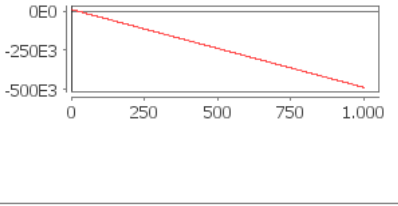
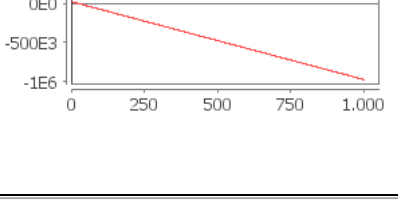
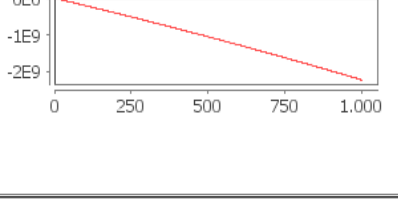
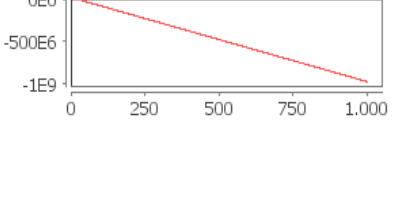
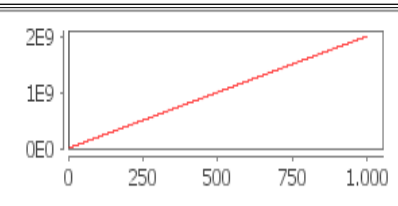
Type	Variable Name And Description	
#1 A	<p><b>agua condensada (m3)</b> = <a href="#">agua evaporada</a> Description: cantidad de agua en estado de condensación Present In 1 View: • <a href="#">View 1</a></p> <p>Used By • <a href="#">agua en precipitacion</a> cantidad de agua en estado de precipitación</p> <p>Feedback Loops: 0 (0.0%) (+) 0 [0,0] (-) 0 [0,0]</p>	
#2 F,A	<p><b>agua en precipitacion (m3)</b> = <a href="#">agua condensada</a> / 2 Description: cantidad de agua en estado de precipitación Present In 1 View: • <a href="#">View 1</a></p> <p>Used By • <a href="#">agua subterranea</a> define de la cantidad de agua en los cuerpos de agua subterraneos</p> <p>Feedback Loops: 0 (0.0%) (+) 0 [0,0] (-) 0 [0,0]</p>	
#3 A	<p><b>agua evaporada (m3)</b> = <a href="#">cuerpos de agua</a> / 1000 Description: cantidad de agua en estado de evaporación Present In 1 View: • <a href="#">View 1</a></p> <p>Used By • <a href="#">agua condensada</a> cantidad de agua en estado de condensación</p> <p>Feedback Loops: 0 (0.0%) (+) 0 [0,0] (-) 0 [0,0]</p>	
#10 L	<p><b>agua subterranea (m3)</b> <math display="block">= \int (\text{agua en precipitacion} - \text{filtracion}) - \text{extraccion 2} dt + 20000000.0</math> Description: define de la cantidad de agua en los cuerpos de agua subterraneos Present In 1 View: • <a href="#">View 1</a></p> <p>Used By</p> <p>Feedback Loops: 0 (0.0%) (+) 0 [0,0] (-) 0 [0,0]</p>	
#12 L	<p><b>cuerpos de agua (m3)</b> <math display="block">= \int (\text{filtracion} + (\text{agua tratada} \cdot 6.0)) - (\text{extraccion 1} + \text{extraccion 3}) dt + 20000000.0</math> Description: define de la cantidad de agua en los cuerpos de agua Present In 1 View: • <a href="#">View 1</a></p> <p>Used By • <a href="#">agua evaporada</a> cantidad de agua en estado de evaporación</p> <p>Feedback Loops: 0 (0.0%) (+) 0 [0,0] (-) 0 [0,0]</p>	
#27 L	<p><b>suministro de agua para fracking (m3)</b> <math display="block">= \int \text{extraccion 1} + \text{extraccion 2} dt + 0.0</math> Description: define la cantidad de agua utilizada por el fracking Present In 1 View: • <a href="#">View 1</a></p> <p>Used By • <a href="#">agua reutilizada</a> cantidad de agua que se puede reutilizar</p> <p>Feedback Loops: 0 (0.0%) (+) 0 [0,0] (-) 0 [0,0]</p>	

Figura 7 documentación



### Diagrama causal

Es el conjunto de los elementos que tienen relación con nuestro problema y permiten en principio explicar el comportamiento observado, junto con las relaciones entre ellos, en casos de retroalimentación, forman el Sistema. El Diagrama Causal es un diagrama que recoge los elementos clave del Sistema y las relaciones entre ellos.

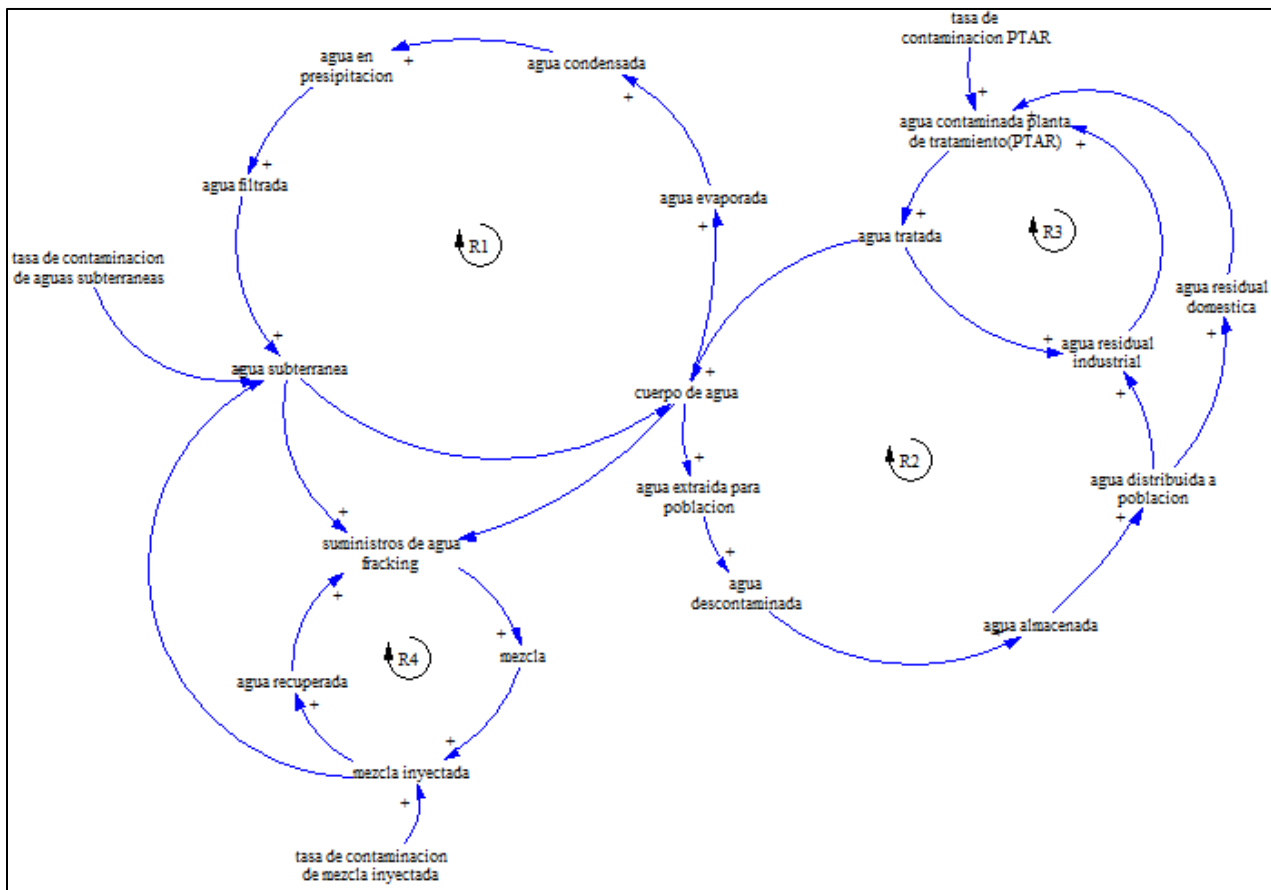


figura 8 Diagrama conceptual, fuente: propia

Como elemento claves tenemos:

### Grupo 1

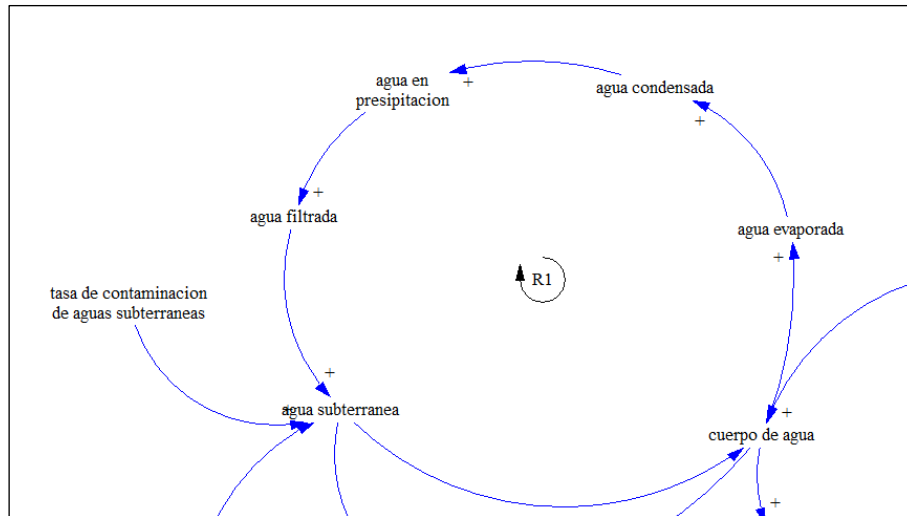


figura 9 Grupo 1, fuente: propia

Este ciclo fue definido como el ciclo básico del agua, para analizar el comportamiento del agua con las actividades del fracking se tiene en cuenta las fases y etapas que transforman el agua para que pueda ser distribuida y utilizada. Lo significativo del ciclo del agua es que es continuo.

- Agua evaporada: define la cantidad de agua evaporada, esta primera fase consiste en la entrada de rayos solares al agua en estado líquido de los mares, ríos, océanos, etc., ésta se comienza a evaporar y pasar a otro estado que es el gaseoso.
- Agua condensada: define la cantidad de agua condensada, durante la condensación, se forma lo que bien conocemos como nubes, las cuales reflejan la luz del sol y a su vez nos protegen de este. También mantienen el calor y ayuda a que varios climas como la nieve o la lluvia sucedan.
- Agua en precipitación: define la cantidad de agua precipitada, gracias a este tipo de precipitaciones ocurren varias cosas. En las zonas más frías esta agua se congela y crea el hielo y los glaciares o nevados, vitales para la existencia de muchos de tipo de vida animal y para el almacenamiento de agua en forma de hielo. También gracias a la precipitación los campos y sembradíos reciben agua, lo cual ayuda al desarrollo de la agricultura. Otro de sus beneficios es que debido a esta lluvia es el aumento de los niveles de agua en ríos, lagos y mares.
- Agua infiltrada: define la cantidad de agua infiltrada, consiste en que el agua entra al subsuelo. Esta más tarde, vuelve a la superficie a través de los ríos,

mares, lagos. Luego de esto se vuelve a evaporar y comenzar el ciclo de nuevo.

- Agua subterránea: define la cantidad de agua subterránea o acuíferos, Los acuíferos son reservorios de agua que están ubicados debajo de la superficie terrestre. Estos acuíferos permiten la circulación del agua a través de diversas grietas y de la permeabilidad de su estructura.
- Cuerpos de agua: define la cantidad de agua que contiene el cuerpo, Las masas de agua o cuerpos de agua son las extensiones de agua que se encuentran por la superficie terrestre, pueden ser ríos, lagos, manantiales etc.

## Grupo 2

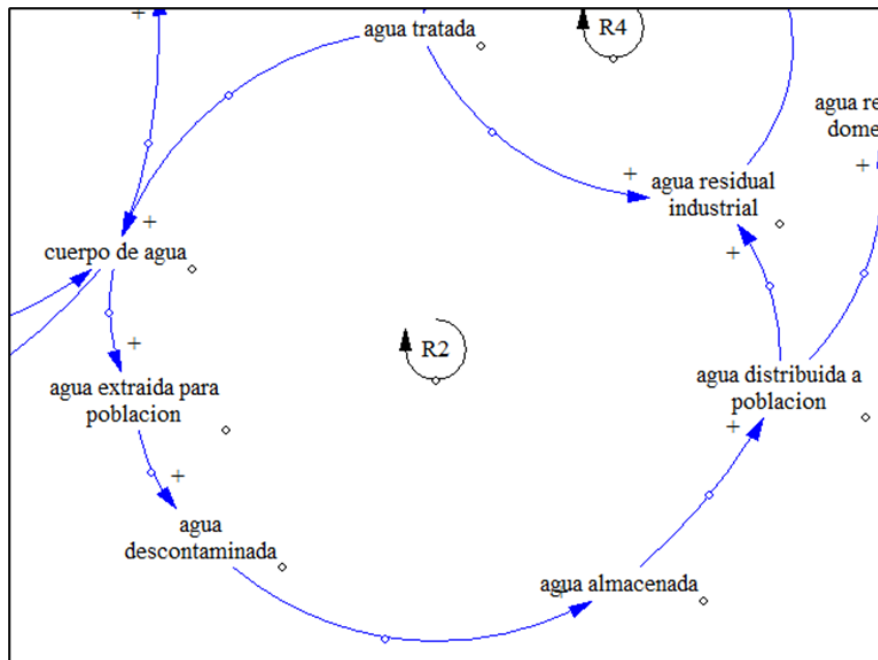


figura 10 Grupo 2, fuente: propia

Colombia es un país con una importante oferta de agua, según el Estudio nacional de agua (ENA), el rendimiento medio por año es de 56 l/s–Km<sup>2</sup> más de 5 veces el rendimiento promedio mundial (IDEAM, 2015). A pesar de lo anterior, hay escasez y estrés hídrico que se agravan por los fenómenos de cambio climático y variabilidad climática y por la presión que se ejerce sobre las fuentes de agua.

El ciclo representa el viaje que realiza el agua distribuida a la población desde un cuerpo de agua.

- Cuerpo de agua

- Agua extraída para población: define la cantidad de agua extraída para la población por las PTAP que son las plantas de tratamientos de agua potable, estas se encargan de descontaminar el agua con diferentes procesos que la llevan a un estado de consumo.
- Agua descontaminada: define la cantidad de agua descontaminada por las PTAP
- Agua almacenada: define la cantidad de agua almacenada por las PTAP
- Agua en distribución a población: define la cantidad de agua distribuida por las PTAP hacia los ciudadanos.

### Grupo 3

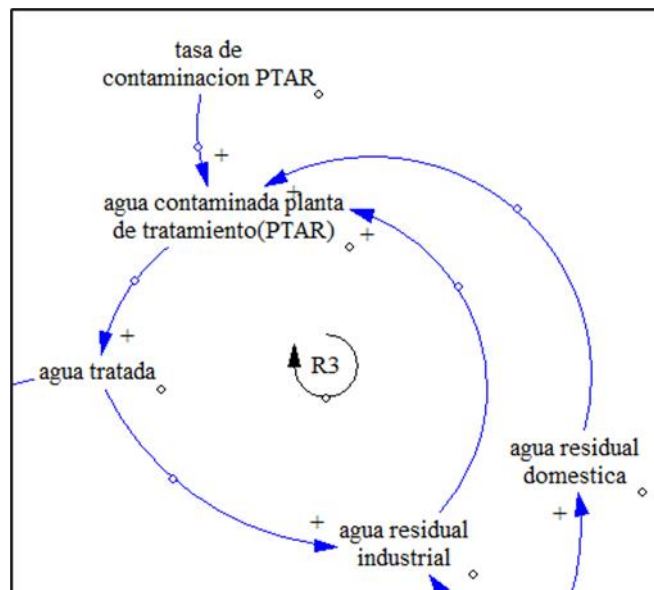


figura 11 Grupo 3, fuente propia

El ciclo representa el transporte de aguas distribuidas por la población a una descontaminación para nuevos usos.

- Agua residual industrial: define o se refiere a la cantidad de agua usada por la empresas o industrias, estas aguas suelen tener un índice de contaminación mayor al de las aguas residuales domésticas y por tal motivo deben ser tratadas para la reutilización en estos mismos procesos.
- Agua residual domestica: define la cantidad de agua utilizada por las casas o residencias domésticas.

- Agua contaminada (planta de tratamiento PTAR): define la cantidad de agua que es tratada por las PTAR.
- Agua tratada: define la cantidad de agua tratadas y lista para reusar o en algunos casos desechar en el cuerpo de agua cercano sin ningún tipo de estudio de viabilidad.

#### Grupo 4

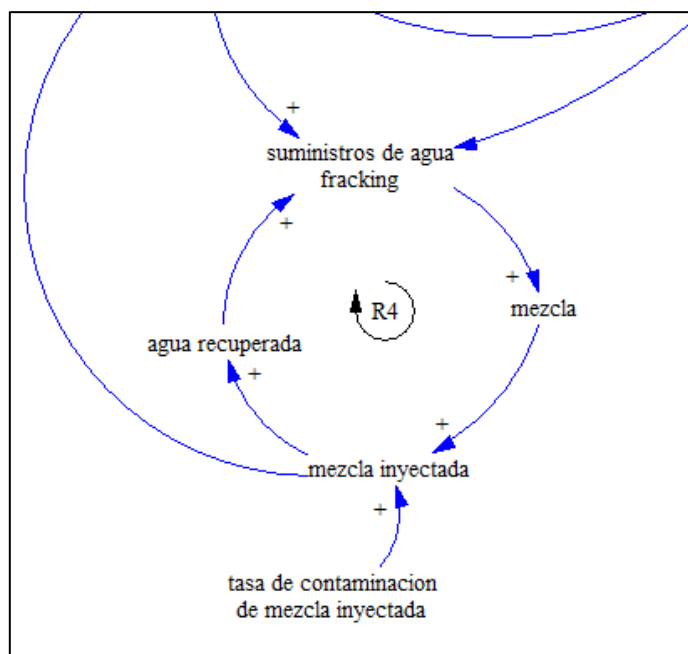


figura 12 Grupo 4, fuente: propia

Representa el ciclo del fracking, en cuanto al uso del agua y sus otros aditivos.

- Suministros de agua fracking: define la cantidad de agua usada para realizar el fracking en los yacimientos no convencionales.
- Mezcla: define la cantidad de mezcla preparada para su inyección incluyendo:

agua (90 % solución base) + aditivos químicos (0,5%) + agente apuntalante (9,5 %)

- fluido recuperado: define la cantidad de agua recuperada.

El fluido de retorno generado después de la estimulación hidráulica es llevado a la superficie; este puede ser entre el 20 % y el 80 % del fluido usado para el fracturamiento. Este fluido se almacena temporalmente en embalses o camiones para ser reciclado, reutilizado, tratado o para su eliminación. La inadecuada gestión

del fluido de retorno puede ocasionar contaminación en el suelo, deteriorar la calidad del recurso hídrico y producir efectos crónicos sobre los organismos acuáticos. (C. G. Groat y T. W. Grimshaw) (Sharel Charry-Ocampo)

### Modelo Dinámico

El modelo actual es una representación de la cantidad de agua que se transporta a través de varios ciclos del agua tanto naturales como no naturales, incluyendo el del fracking (como un ciclo no natural que realiza extracciones de recurso hídrico), la distribución de esta agua a la población y su recorrido natural.

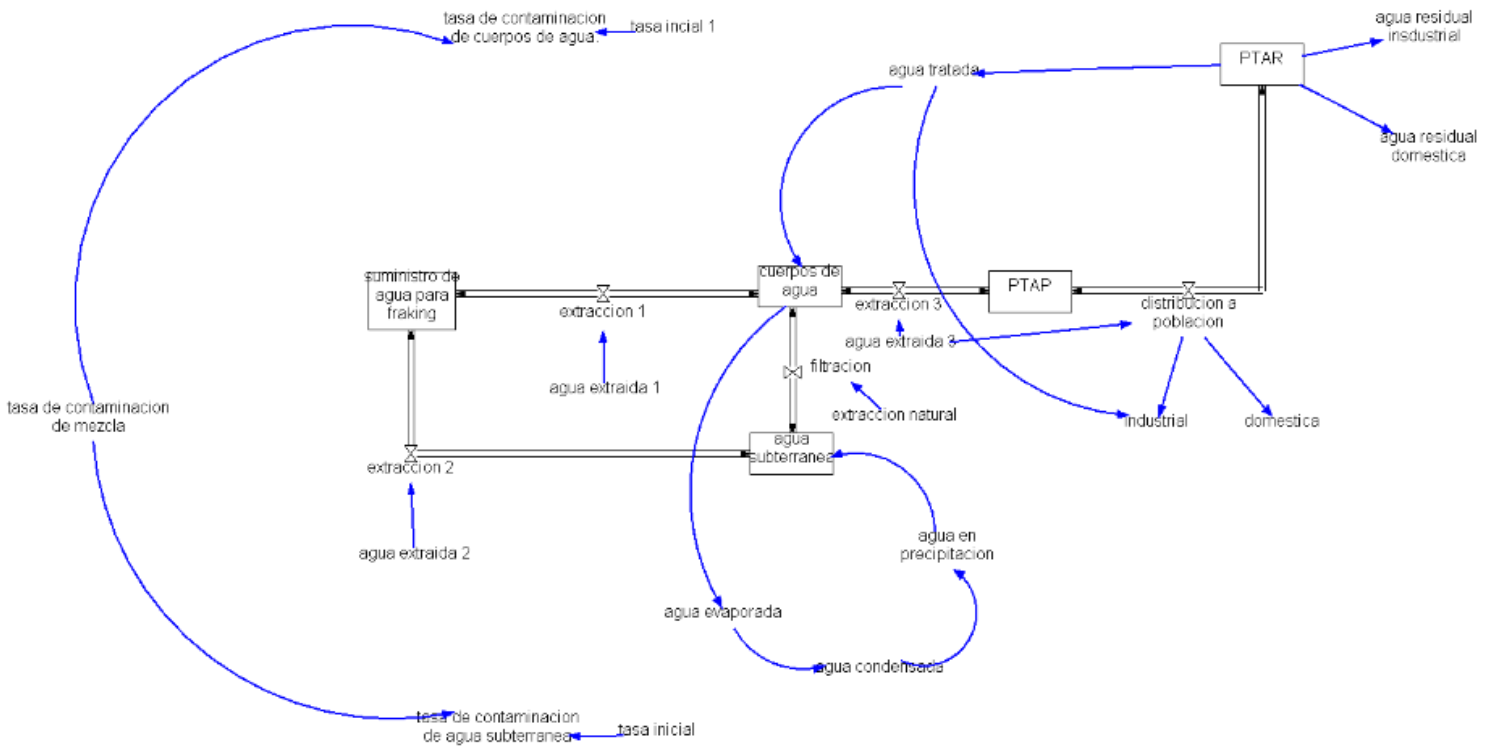


figura 13 Modelo dinámico

### 7.3 Un documento con un análisis de los Resultados obtenidos.

Los resultados de las variables de nivel principales son:

**Suministros de agua para fracking:** define la cantidad de agua utilizada por el fracking por medio de la suma de 2 extracciones y sus mezclas realizadas para la inyección.

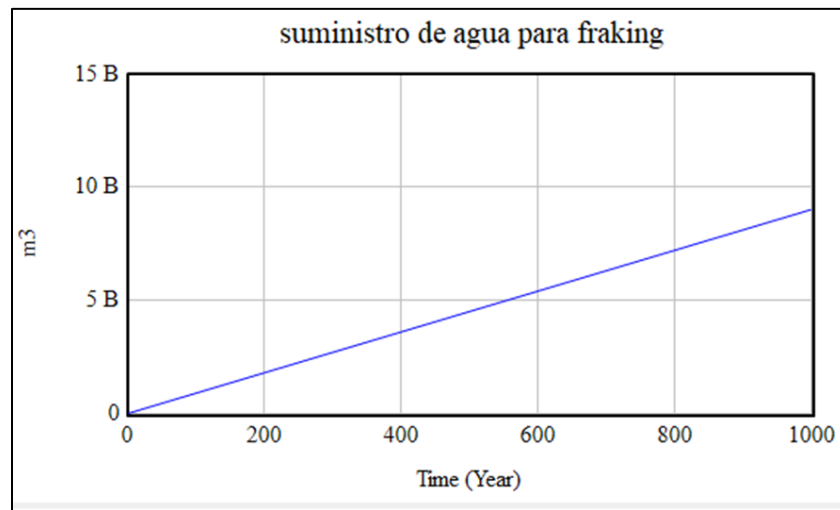


figura 14 Resultado 1, fuente: propia

La cantidad de agua en el fracking anteriormente explicada, se muestra en incremento proporcional con el tiempo, con una cantidad inicial de 0, haciendo referencia la cantidad de agua ya utilizada. A lo largo del tiempo se nota como el fracking gasta cantidades enormes de agua de proceso en proceso si no se incluyera la reutilización de la misma.

Los datos pueden tomar una perspectiva alarmante pero estas cantidades de agua utilizadas son completamente normal para estos procesos, Según la página oficial de Ecopetrol, durante el 2012 captaron 55,76 millones de metros cúbicos de agua de 217 fuentes hídricas lo cual es una cifra grande.

#### Cuerpos de agua

Define de la cantidad de agua en los cuerpos de agua, siendo disminuida por la extracción y aumentada por la filtración natural, que es el agua filtrada en el sistema subterráneo por parte de las aguas subterráneas.

La variable “agua tratada” también aporta a “cuerpos de agua”, no en una gran mayoría, pero si un poco, al realizar esta relación se está haciendo referencia a la cantidad de agua tratada que las PTAR vuelve a derramar en los diferentes cuerpos

de agua, ya sean ríos, pozos etc. La variable “agua tratada” aporta en el crecimiento de las aguas para uso industrial, ya que un gran porcentaje de esta se reutiliza para estos casos.

Los cuerpos de agua de ven modificados por PTAP, pero estas afectaciones no son descontroladas, pues el agua que extrae las plantas de tratamiento de agua potable es controlada para perdurar la vida de los cuerpos de agua y para beneficio de la población. Esta agua distribuida para la población es recibida por PTAR , que trata el agua residual de toda la población de la zona.

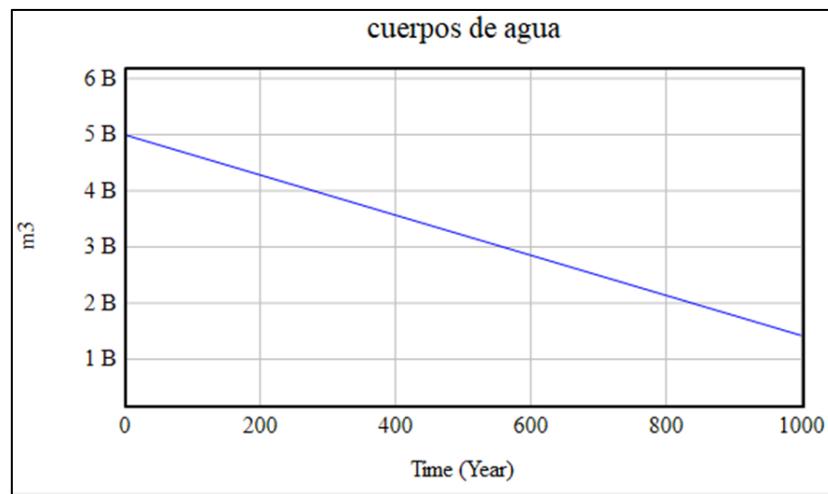


figura 15 Resultado 2, fuente: propia

El resultado concuerda con una gráfica decreciente del recurso hídrico a través del tiempo, nos enseña una disminución en la cantidad de agua en los cuerpos de agua, como ríos, pozos, lagos etc. Los efectos en la disminución del recurso hídrico se ven con claridad después del rango de los 100 años, ya que el gasto hídrico aumenta poco a poco sin recuperación alguna.

Que disminuya el caudal de los cuerpos de agua no solo significa la disminución de la misma, sino también grandes cambios en el entorno, como en sus especies animales, en la flora del lugar o en la calidad y cantidad del recurso en las zonas de distribución a la población cernaca, también puede presentar desventajas para diferentes actividades comerciales de la zona, como la pesca y la agricultura, turismo etc.

### Agua subterránea

la variable de nivel “agua subterránea” define la cantidad de agua en los cuerpos de agua llamados acuíferos, esta variable disminuye según la cantidad de agua



extraída por parte del fracking y según la cantidad de agua inducida por la misma naturaleza, por medio de los ciclos de evaporación, condensación y precipitación.

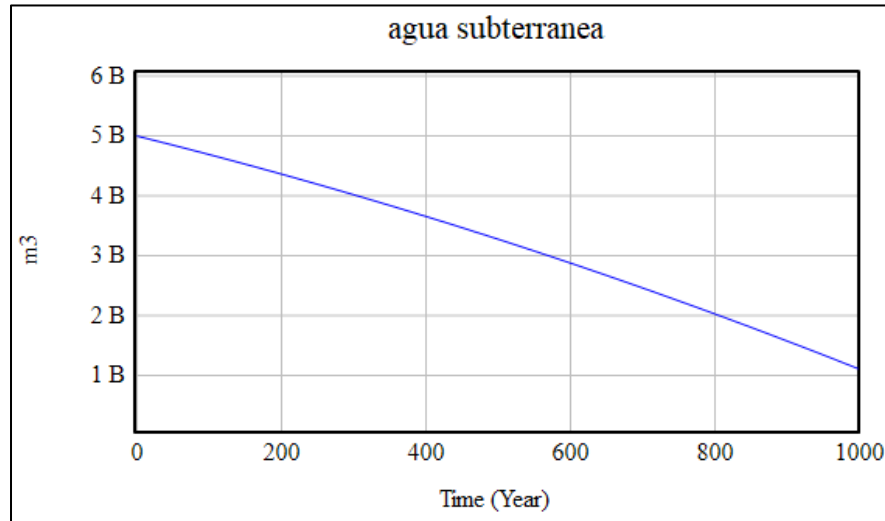


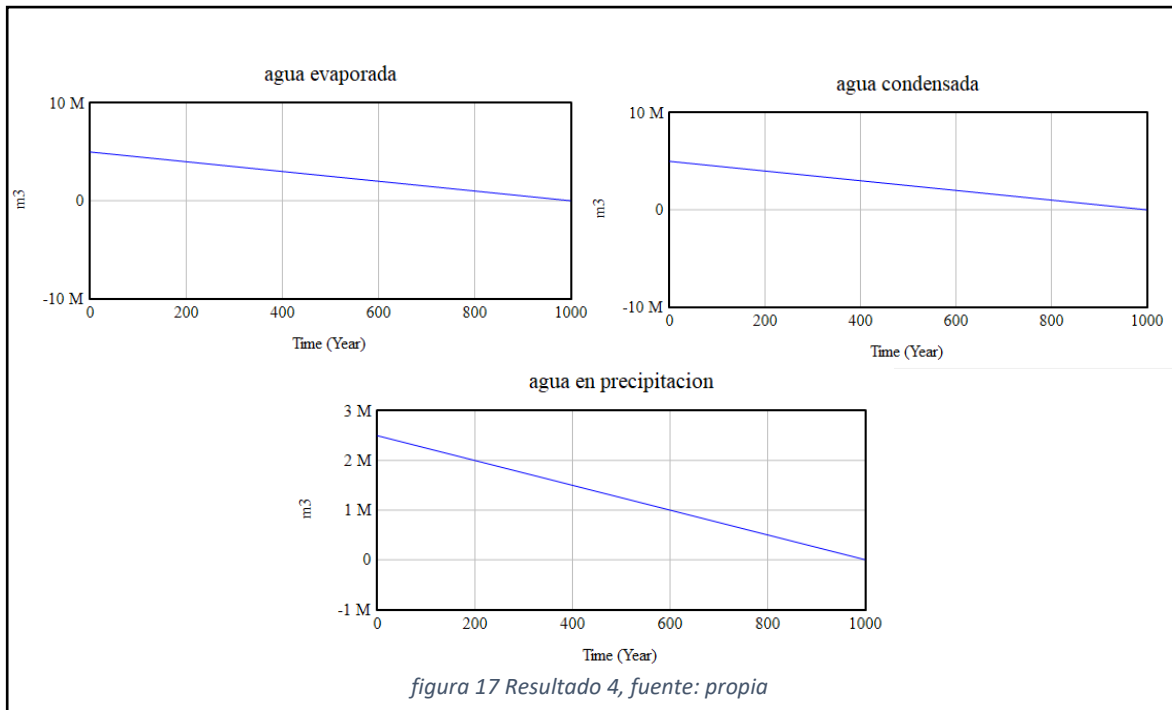
figura 16 Resultado 3, fuente: propia

El resultado concuerda con una gráfica de una curva decreciente, refiriéndose a la cantidad de recurso hídrico en los acuíferos, pero un poco más lenta en comparación con los resultados referentes a “cuerpos de agua”. Dando a entender la disminución en la cantidad de agua subterránea que ya se empieza a notar desde el año 200.

Las aguas subterráneas son una fuente crítica de agua potable para casi la mitad de la población mundial, además de suplir necesidades de irrigación en la agricultura. Por otro lado, éstas son también importantes para el sostenimiento de corrientes, lagos, humedales y otros ecosistemas asociados.

El flujo subterráneo en acuíferos forma parte del ciclo hidrológico, y resulta afectado por las diferentes actividades que realizamos los humanos como el fracking. Los niveles subterráneos de numerosos acuíferos han experimentado una tendencia decreciente durante los últimos años, aunque ello se debe, por lo general, al bombeo de agua subterránea a un mayor ritmo que la recarga, y no a una disminución freática relacionada con el clima. Ahora bien, si sumamos el gasto por las diferentes técnicas de extracción de petróleo, los resultados serían cada vez más bajos.

### Perturbación del ciclo hidrológico.



Sabemos que la fractura hidráulica requiere grandes cantidades de agua, primero para enfriar, lubricar y extraer la tierra durante la perforación y después sobre todo en la inyección de agua presurizada, junto con los productos químicos, para la creación de las fracturas.

Es importante resaltar que el agua que se usa en el fracking se pierde definitivamente para el ciclo hidrológico ya que:

- permanece en el pozo
- se recicla para el fracking de nuevos pozos
- se desecha en pozos profundos para descartar los remanentes de la operación.

Por cualquiera de estas causas, además de estar contaminada, no queda disponible para recargar los acuíferos.

A la fecha no existe tratamiento efectivo para el agua de retorno, lo que la deja inutilizable para otros usos y fuera del ciclo hidrológico. Para su manejo se ha buscado aislarla e inyectarla en “pozos letrina”, pero esto no es una solución, ya que se ha comprobado que estos pozos se filtran y han contaminado acuíferos enteros.

El reciclaje del agua de retorno es un proceso lento, complejo y no siempre eficaz; requiere que se usen sustancias adicionales y el agua solo puede reciclarse hasta una cierta concentración de sólidos totales disueltos. Algunas plantas que tratan esta agua no pueden eliminar grandes cantidades de sólidos disueltos y dichos sólidos (sales, compuestos orgánicos, metales pesados) en los fluidos de fracking pueden impedir el tratamiento.) (Albert L. 2018)

Es importante tomar en cuenta que la mayor parte de las actividades realizadas por el hombre para obtener beneficios implica cambios y alteraciones en el ambiente, por lo que es necesario buscar alternativas para lograr un mejor aprovechamiento del agua, sin poner en riesgo su ciclo natural.

#### **7.4 Un Conjunto de Políticas de protección ambiental con respecto los resultados obtenidos de las simulaciones**

El uso del agua potable como principal fluido en las operaciones de fracturamiento tiene varios impactos ambientales que podrían ser minimizados si se logra reducir el agua en la operación, o mejor si se sustituye como materia prima en el fluido de fracturamiento. El principal problema ambiental, del cual se derivan otros, es que las operaciones de fracturamiento hidráulico necesitan altos volúmenes de agua (8000m<sup>3</sup> y 16000m<sup>3</sup>), que deben ser extraídos de alguna fuente.

En cuanto a la adquisición del recurso, radica en la necesidad de captar grandes volúmenes de agua en un periodo de tiempo relativamente muy corto, causando a la vez una competencia con otros sectores productivos (agricultura, industrial y doméstico) para tener garantizadas las necesidades de suministro de este recurso. esto también ocasiona una disminución del caudal ecológico mínimo para la supervivencia de las especies acuáticas (flora y fauna). (MEHTA,Neha)

#### **Estrategias de producción limpia**

Según el Manual de la ONUDI(Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial), la Producción más Limpia (PML) es “la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente. los procesos en los cuales está implicado el uso del agua son: captación, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final. Entre los productos se destacan el flowback o agua de retorno y entre los servicios se encuentra la inyección del agua tratada, pero no vertida a los sistemas hídricos debido a la alta carga de contaminantes.

La aplicación de un sistema PML para una operación de fracturamiento hidráulico implica considerar ambiental y técnicamente las entradas y salidas de la producción. En este sentido, no se pueden minimizar los desechos en la producción sin considerar al mismo tiempo los materiales utilizados. Por consiguiente, la implementación de la PML implica tanto el manejo de los desechos industriales y la minimización de los mismos, como el aumento del grado de utilización de las materias primas (Agua dulce). (CAMILO GÓMEZ 2016)

El abordaje de las estrategias de PML para minimizar el uso del agua en las operaciones de fracturamiento hidráulico, implica conocer el ciclo de vida del agua en una operación. Tanto la cantidad de agua necesaria para el proceso como el agua de retorno que puede disponerse o recircular al proceso.

Las estrategias de PML aplicadas al proceso de fracturamiento hidráulico pueden ir desde la sustitución de materias primas al cambio de tecnologías más limpias y eficientes. Para su aplicación correcta en una empresa, la PML debe basarse en un Sistema de Gestión Ambiental que puede ir desde la implementación de una buena práctica ambiental o una norma técnica.

La identificación de las estrategias de PML que pueden ser implementadas se establecen en un enfoque piramidal que ha sido utilizado principalmente para el manejo de efluentes de una producción, pero que como se recordara implica tanto las entradas como salidas para garantizar la eficiencia (técnica y ambiental) de un proceso industrial cualquiera. El triángulo o pirámide de estrategias PML mostrado a continuación establece prioridades en las estrategias. (CAMILO GÓMEZ 2016)

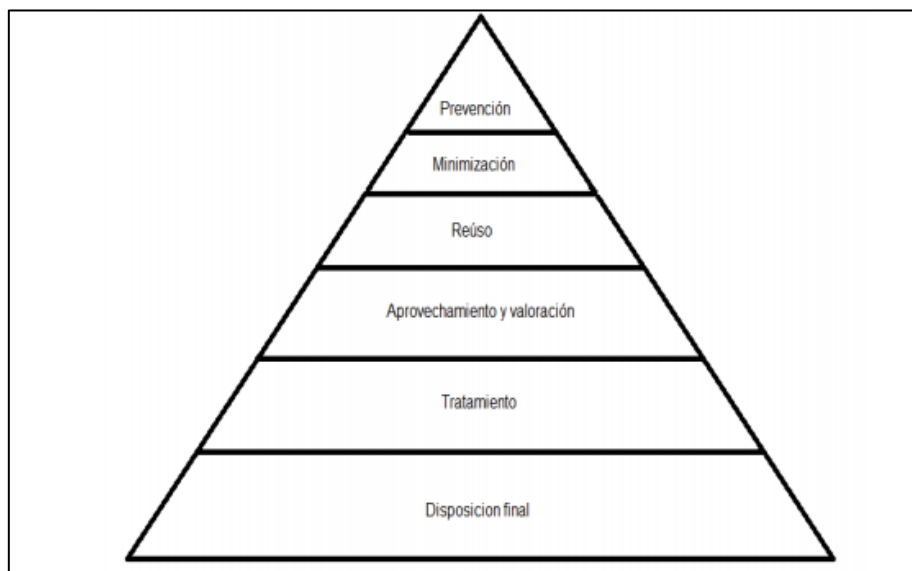


figura 18 pirámide PML fuente: CAMILO ANDRÉS GÓMEZ ACOSTA

### **Sustitución del uso del agua potable (Agua de Mar)**

La principal diferencia entre el agua potable y el agua de mar, es la cantidad de sales inorgánicas disueltas, las cuales pueden afectar la capacidad del polímero guar para hidratar y producir viscosidad, además de su alta influencia en el control del pH. El agua de mar contiene alrededor de 3,5% de sales (35 gramos por cada litro de agua), las cuales se componen de Cloro (55%), Sodio (30,6%), Sulfatos (7,7%), Calcio (1,2%), Potasio (1,1%), Magnesio (3,7%) y otros constituyentes menores (0,7%).

La idea de utilizar agua de mar se convirtió en una opción para cambiar el agua potable en las operaciones de fracturamiento hidráulico ya que, en las plataformas offshore principalmente, resultaba demasiado costoso el transporte y almacenamiento de agua potable. Por esta razón, la dificultad de elevados costos se resolvió desarrollando un sistema de fluido fracturante a base de agua de mar. Más de 100000 operaciones de fracturamiento se han realizado usando agua de mar como base del fluido en operaciones costa afuera. (CAMILO GÓMEZ ACOSTA 2016)

### **Reúso y Reciclaje del agua de retorno y producida**

Las operadoras cada día analizan más la alternativa de Reusar y Reciclar el agua de retorno (flowback y producida) ya que así pueden disminuir el uso de agua dulce, y por lo tanto reducir los costos operacionales que hacen referencia al manejo del agua. Por otro lado, con el reúso del agua se reduce la huella ambiental que se produce en el desarrollo de las operaciones de un yacimiento no convencional.

Existen diferentes tecnologías de tratamiento del agua que pueden ser seleccionadas para reusar el agua de retorno como lo son la destilación térmica y la oxidación avanzada. La destilación térmica descontamina el agua por medio de procesos de transferencia de calor interno, y disminuye la cantidad de sólidos disueltos (TDS) para que el agua después del tratamiento quede adecuada para posteriores operaciones de fracturamiento o de perforación. Mientras que la oxidación avanzada por medio del Dióxido de Cloro (ClO<sub>2</sub>) reduce los componentes férricos y elimina las bacterias que causan corrosión en el pozo, para reusar el agua y poder diseñar un nuevo fluido fracturante que sea compatible con la formación. Es decir, que la tecnología de tratamiento del agua debe ser seleccionada de acuerdo al contaminante y la eficacia que se quiere remover del flowback.

Por otro lado, se recomienda realizar el tratamiento dentro del mismo campo, ya que de esta manera se reducen los riesgos que conlleva el transporte del agua contaminada hasta otros sitios de tratamiento, así como se eliminan los costos del transporte del agua. La meta del manejo del agua debe ser reusar y reciclar el 100% del agua que retorna a la superficie para diseñar nuevos fluidos fracturantes, ya que

de esta manera se reduce la necesidad de utilizar agua potable dentro de las operaciones de fracturamiento hidráulico.

### **POLÍTICA DE GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA**

En Colombia la gestión ambiental que se realiza sobre el recurso hídrico se basa en una normativa que contempla aspectos que van desde el ordenación, saneamiento básico y agua potable, manejo de vertimientos, planes de ahorro y uso eficiente del agua y planificación de los principales ecosistemas que contienen el recurso hídrico (aguas subterráneas, paramas, humedales y ciénagas y mares y costas).

En la Política Nacional para la Gestión del Recurso hídrico, el objetivo de la demanda hace referencia a “caracterizar, cuantificar y optimizar la demanda de agua en el país. Para cumplir dicho objetivo se han diseñado tres estrategias:

- 1) Caracterización y cuantificación de la demanda del agua en cuencas prioritizadas**
- 2) Incorporación de la gestión integral del recurso hídrico en los principales sectores productivos usuarios del agua**
- 3) Uso eficiente y sostenible del agua.**

De estas tres estrategias, las dos últimas son las que se adaptan a las estrategias de minimización de uso del agua identificadas.

Según la Política Nacional del recurso hídrico, la estrategia de Incorporación de la gestión integral del recurso hídrico en los principales sectores productivos usuarios del agua: “se orienta a promover y apoyar la adopción de herramientas de gestión integrada para el uso del recurso hídrico por parte de los sectores productivos del país que sean mayores consumidores de agua. Para tal fin se prevén las siguientes líneas de acción estratégicas: Incorporar las directrices de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en los planes estratégicos y de acción de los principales sectores usuarios del recurso hídrico priorizados en el Plan Hídrico Nacional. (CAMILO GÓMEZ ACOSTA 2016)

Por otro lado, la estrategia del uso eficiente y sostenible del agua se orienta a fortalecer la implementación de procesos y tecnologías de ahorro y uso eficiente y sostenible del agua entre los principales consumidores de agua en el país, así como, a promover el cambio de hábitos no sostenibles de uso del recurso hídrico entre los usuarios comunes del recurso hídrico. Para tal fin se prevén las siguientes líneas de acción estratégicas:

- Incrementar la utilización de tecnologías ahorradoras y de uso eficiente del agua. Se analizaron las tecnologías para el reúso y reciclaje del agua, las cuales cada día hacen más eficiente el uso del agua en las operaciones de fracturamiento hidráulico. Nuevos fluidos que requieren menos uso de agua.

- Adoptar programas de reducción de pérdidas de agua y de mejoramiento de la infraestructura obsoleta existente en los sistemas de abastecimiento de agua para cualquier uso.
- Desarrollar e implementar mecanismos que promuevan cambios en hábitos de consumo no sostenibles en los usuarios del agua. Por ejemplo, la modificación del proceso. En vez de realizar la disposición del agua de retorno, se reusa y se recicla. Así como realizar una sustitución en el cambio del fluido.

En conclusión, para la implementación del fracturamiento hidráulico en la explotación de yacimientos no convencionales en Colombia, se recomiendan evaluar las estrategias de minimización del agua desarrolladas en este trabajo, con el fin de realizar unas operaciones que no perjudiquen el recurso hídrico del país y que no se generen conflictos por el uso del agua entre los diferentes sectores que utilizan de ella. Adicionalmente, las operadoras que desarrollen estas operaciones siempre deben seguir los lineamientos de la Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico. (CAMILO ANDRÉS GÓMEZ ACOSTA)

### 7.5 Un documento con una análisis y evaluación de las políticas planteadas.

#### Reúso y Reciclaje del agua de retorno

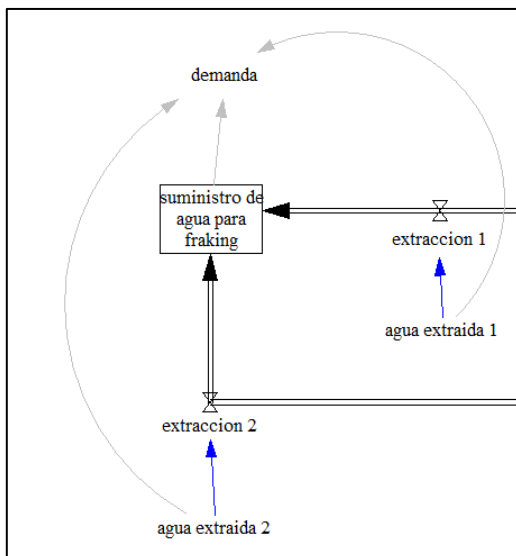


figura 19 Reutilización en modelo

Instruyendo al modelo el proceso de reutilización del agua en un 50 % por parte de los realizadores de estas actividades obtenemos una disminución en la demanda y el uso del recurso hídrico para esta técnica. Disminuyendo poco el suministro de agua para el fracking. Si analizamos la demanda obtenemos como resultado una grafica decreciente indicándonos que cada vez se necesita menos agua por proceso, eso utilizando la mitad de agua extraída.

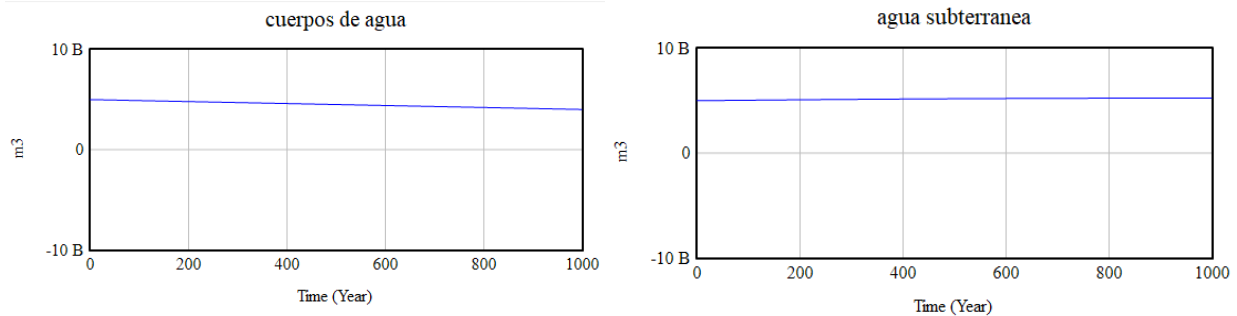
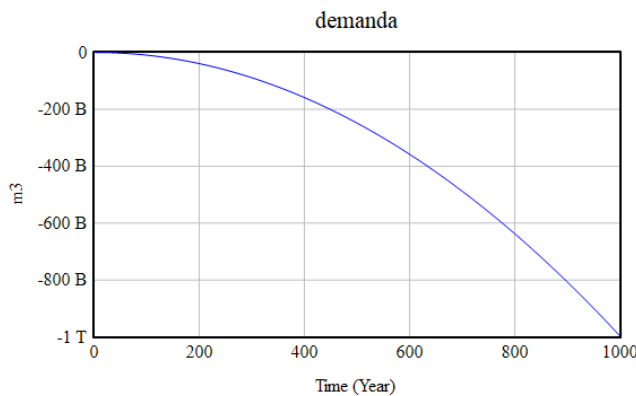


figura 20 resultados de la reutilización

Para los cuerpos de agua obtendremos una leve disminución poco notable en el gasto , ya que se esta extrayendo menos que antes. En cuanto a las aguas subterráneas tendremos un resultado favorable y alentador para el futuro del recurso hídrico, gracias al ciclo hidrológico retomarían su comportamiento normal.



Ahora, si hablamos de la demanda del recurso hídrico, los resultados con estas medidas de manejo de uso y reutilización serían positivos en comparación al uso de agua en un proceso normal. (esto sin modelar el recargo de agua, ya que después de cierto tiempo de reutilización es imposible el reúso.)

figura 21 demanda de recurso hídrico

Esta política de buen manejo y reúso podría aliviar uno de los principales problemas del fracking pero a su vez podría ser una arma de doble filo, ya que el proceso de limpieza de el agua después del proceso de salida generaría un costo adicional elevado, además de contemplar daños de contaminación aún peores si no se hace adecuadamente y con todos los estándares de calidad.

Purificar el agua no es un proceso fácil y menos para el fracking, los residuos solidos son muy difíciles de retirar del material liquido, pero gracias a los avances en estas técnicas se podrá contemplar como solución en algunos años.

Científicos de la Academia China de Ciencias y la Universidad China de Petróleo (Pekín) han demostrado que el CO<sub>2</sub> puede producir un fluido de fracturación hidráulica (fracking) mejor que el agua. Su investigación, podría ayudar a empezar



el camino para una forma de fracking más ecológica que se duplicaría como un mecanismo para almacenar el CO<sub>2</sub> atmosférico capturado. "Demostramos que el CO<sub>2</sub> tiene una mayor movilidad que el agua y, por lo tanto, la presión de inyección se puede entregar mejor a la porosidad natural de la formación", dice Sun. "Esto cambia el mecanismo por el cual se crean las fracturas, generando redes de fracturas más complejas que resultan en una producción de gas de esquisto más eficiente". (Zhou, Jinhui , Guo, Y. & Zhang, J.2019)

### **Sustitución del uso del agua potable (Agua de Mar)**

El uso del agua de mar generaría un cambio positivo en el gasto del recurso hídrico potable pero la explotación de hidrocarburos en el mar conlleva una serie de riesgos dado el ambiente hostil donde desarrolla sus actividades. Los yacimientos en el mar son cada vez más difíciles de descubrir. Las nuevas reservas de petróleo y gas costa afuera no alcanzan a cubrir el agotamiento de energía debido al consumo creciente de la humanidad. Con esto en mente, los gobiernos no dudan en autorizar el método de fractura hidráulica para maximizar la extracción en pozos offshore. Los equipos y tecnología necesarios para estas perforaciones son extremadamente caros, en algunos casos su utilización demanda la erogación de hasta un millón de dólares por día (National Commission, 2011). Por esta razón es necesaria una alta productividad de los yacimientos a fin de justificar las inversiones.

El agua salobre se vuelca al mar y el CO<sub>2</sub> se inyecta en formaciones permeables profundas, a través de un pozo paralelo, siguiendo procedimientos conocidos como Captura y Almacenamiento de Carbono. Sin embargo, este confinamiento no está garantizado a través del tiempo, dado que no hay certeza de que el sello impermeable que encapsula el CO<sub>2</sub> no se vea afectado en el futuro, permitiendo pérdidas de este gas. El método es un ensayo experimental a gran escala pero sin garantías de suceso (van der Tuuk Opedal, 2013).

Los pozos en el mar comparten los mismos problemas de los pozos en tierra: fallas en la cementación de cañerías, pérdidas a través de cementaciones defectuosas o a través de roturas en cañerías y roscas, y corrosión generalizada (Vengosh, Avner et al., 2011). Todas las estructuras marinas están expuestas a la corrosión de manera permanente desde el momento que son instaladas, requiriendo una inspección constante y métodos de protección catódica para demorar lo más posible el efecto de deterioro. Aun así la vida útil de las instalaciones es muy limitada (Technical Report, 2006). (Gzulma 2016)

## 8.0 Conclusiones

Las investigaciones geológicas en el planeta acerca de las verdaderas reservas de hidrocarburos en yacimientos no convencionales aún se desconocen, pero se cree que existen muchos recursos para compensar la demanda energética que estamos creando, sin embargo estas investigaciones representan un reto para la geociencias ambientales ya que los impactos ambientales requieren aun mas investigación, sobre todo los modelos numéricos que permita identificar de forma cuantitativa los verdaderos impactos ,haciendo posible así el diseño de estrategias para disminuir los impactos de estos procesos.( B. R. Scanlon, B. L. Ruddell)

Una tendencia mundial que debe ser tenida en cuenta en el contexto colombiano es la evaluación de otras técnicas para la explotación de gas no convencional que no afecten el recurso hídrico tan significativamente. Por ejemplo, D. H. Nielson presentó un procedimiento para evitar la necesidad de fracturar yacimientos, el cual consistía en la gasificación de la lutita mediante un calentador de gas dentro del agujero de perforación. Este procedimiento no generó las mismas tasas de producción que la estimulación hidráulica, así que en ese momento su implementación no fue atractiva para el sector industrial. Pero con el desarrollo de nuevos materiales y nuevos equipos se pueden explorar nuevas tecnologías que permitan reducir los impactos de la estimulación hidráulica en el ambiente. ( D. H. Nielson) (Sharel CharryOcampo)

Los estudios más recientes afirman que el agua consumida por el fracking no se puede comparar con el agua consumida en la producción de alimentos, por esta razón se debe considerar los problemas por uso de agua que se pueden generar en diferentes partes del país donde se tenga proyectado realizar explotación de yacimientos no convencionales y que al mismo tiempo sean zonas con poco recurso hídrico, por ausencia de fuentes superficiales y bajas precipitaciones.

Es importante el desarrollo de modelos numéricos durante la fase por la que Colombia está en progreso, principalmente en los sitios con mas vulnerabilidad, esto permitirá estimar los verdaderos riesgos que van de la mano con el fracking, con la finalidad de contar con la información para así calibrar y validar los modelos.

## 9.0 Referencias

ACP. (s.f.). ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Obtenido de ACP.COM: <https://acp.com.co/web2017/es/>

AGUDELO, C. I. (2017). *ANÁLISIS JURÍDICO DEL MARCO LEGAL DE LOS HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES Y DE LAS IMPLEMENTACIONES EN EL DERECHO AMBIENTAL DE LA TÉCNICA FRACKING*. . Bogota D.C: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA .

Agudelo, I. J. (2016). IMPACTOS AMBIENTALES DEL FRACKING ANALIZADO DESDE LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL DE ESTADOS UNIDOS. *IMPACTOS AMBIENTALES DEL FRACKING ANALIZADO DESDE LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL DE ESTADOS UNIDOS*. ucatolica.

AGUIRRE, C. L. (s.f.). *“El Fracking: impactos ambientales y socioeconómicos”*. MADRID.

Aitor Urresti González, F. M. (2012). *Fracking una fractura que pasa factura*.

BARANDIARAN, L. C. (2011). Definición de Reservas Petroleras. *oil shale*, 3-13.

Carlos Enrique Ángel Martínez, M. D. (2018). *RIESGOS Y POSIBLES AFECTACIONES AMBIENTALES AL EMPLEAR LA TÉCNICA DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS EN YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES EN COLOMBIA*. Contraloría General De La República.

Catalina, I. M. (septiembre de 2010). Modelo De Dinámica De Sistemas Para La Implenetación De Tecnologías De La Información En La Gestión Estratégica Universitaria.

Cruz, L. F. (5 de septiembre de 2018). ¿Qué es el fracking? *¿Qué es el fracking?* Colombia.

dinamica-de-sistemas.com. (s.f.). [www.dinamica-de-sistemas.com](http://www.dinamica-de-sistemas.com). Obtenido de <http://www.dinamica-de-sistemas.com>

dinero, r. (2019). Colombia, con nuevo récord en producción de petróleo. *dinero*, <https://dinero.com/Item/ArticleAsync/267235?nextId=250354&nextId=224889>.

EPA, U. E. (2016). *Impacts From The Hydraulic Fracturing Water Cycle On Drinking Water Resources In The United States (Final Report)*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

Esper, J. (s.f.). *Biblioteca de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Obtenido de <http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Proyecto/PublicacionesElectro/monografias/EI%20Petr%F3leo.pdf>

ETHERINGTON. (2005). OIL SHALE. citado por CARRILLO BARANDIARAN.

FUENTES, L. M. (2016). ANÁLISIS DE LOS RIESGOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA EXPLOTACION DE

YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES DESDE UN CONTEXTO INTERNACIONAL SU APLICACIÓN EN COLOMBIA. *ANÁLISIS DE LOS RIESGOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA EXPLOTACION DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES DESDE UN CONTEXTO INTERNACIONAL SU APLICACIÓN EN COLOMBIA*. Bogota D.C, Colombia.

Hilary Boudet, C. C. (2014). *“Fracking” controversy and communication: Using national survey data to understand public perceptions of hydraulic fracturing*. febrero.

JULIAO, J. D. (2006). Uso de la Dinámica de Sistemas como herramienta de aprendizaje en contaduría. Colombia: Universidad De La Salle – Facultad de Contaduría Pública.

Loaysa, A. (s.f.). *FRACKING PROCESO Y PROBLEMÁTICA*. Movimiento ambientalista colombiano.

LÓPEZ, C. C. (2018). ANÁLISIS DE LOS RIESGOS OPERACIONALES Y AMBIENTALES DEL FRACKING EN LOS ESTADOS UNIDOS . *ANÁLISIS DE LOS RIESGOS OPERACIONALES Y AMBIENTALES DEL FRACKING EN LOS ESTADOS UNIDOS* . Bogota D.C, Colombia.

Marín, E. H. (s.f.). *“Fracking” en Colombia: un Estudio sobre su Constitucionalidad y legalidad*. Universidad Católica de Colombia.

Martins, A. (2013). *BBC MUNDO*. Obtenido de BBC MUNDO.

Natalia Orduz Salinas, Á. P. (2018). La prohibición del fracking como un asunto de política pública. *Asociación Interamericana para la Defensa de Ambiente (AIDA)* .

Penning, T. (29 de OCTUBRE de 2013). (B. MUNDO, Entrevistador)

Luisa Fernanda Gómez Cruz. (2018). ¿Qué es el fracking?. 2020, de colombiacheck Sitio web: <https://colombiacheck.com/investigaciones/que-es-el-fracking>

Pérez, M. G. (s.f.). Estudios de impacto ambiental con Dinámica de Sistemas. *Boletín de Dinámica de Sistemas*.

Perry, G. O. (junio de 2019). EL IMPACTO DEL PETRÓLEO Y LA MINERÍA EN EL DESARROLLO REGIONAL Y LOCAL EN COLOMBIA. *EL IMPACTO DEL PETRÓLEO Y LA MINERÍA EN EL DESARROLLO REGIONAL Y LOCAL EN COLOMBIA*.

PETRÓLEO, A. C. (2012). Posición de la industria petrolera de Colombia frente al desarrollo de los yacimientos no convencionales. *ACP*, 2-4.

Plural, E. C. (2016). *COLOMBIA PLURAL*. Obtenido de COLOMBIA PLURAL: <https://colombiaplural.com/normativa-colombia-yacimientos-no-convencionales/> Senge, P. (1990). *La quinta disciplina*.

Sharel Charry-Ocampo, A. J. (2017). *EFFECTOS DE LA ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA(FRACKING) EN EL RECURSO HÍDRICO: IMPLICACIONES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO*. scientific electronic library online.

STEVEN RICARDO MORA GONZÁLEZ, N. A. (2015). MODELO CONCEPTUAL DE LA IMPORTANCIA DE BUENAS PRÁCTICAS AMBIENTALES EN LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN COLOMBIA . *System Dynamics Society- XIII Congreso latinoamericano y encuentro colombiano de dinámica de sistemas.*, 311-316.

TIEMPO, E. (2018). ¿Qué es el Fracking y cuáles son sus efectos en el medio ambiente? *EL TIEMPO*.

Venegas, A. A. (s.f.). Asesor Científico de la Asociación Interoamericana para la defensa del Ambiente.

U.S. EPA. (2016). Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-16/236F.

Fierro, J. (2016). Dio declaraciones en el artículo: [Fracking: una apuesta riesgosa para Colombia](http://sostenibilidad.semana.com/medioambiente/articulo/fracking-una-apuesta-riesgosa-paracolombia/35505). Medio Ambiente. Semana Sostenible. <http://sostenibilidad.semana.com/medioambiente/articulo/fracking-una-apuesta-riesgosa-paracolombia/35505>

R. Weijermars, G. Drijkoningen, T. J. Heimovaara et al., “Unconventional gas research initiative for clean energy transition in Europe,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 402-412, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2011.04.002>

N. R. Warner, T. M. Kresse, P. D. Hays et al., “Geochemical and isotopic variations in shallow groundwater in areas of the Fayetteville shale development, north-central Arkansas,” *Applied Geochemistry*, vol. 35, pp. 207-220, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.04.013>

L. O. Haluszczak, A. W. Rose y L. R. Kump, “Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA,” *Applied Geochemistry*, vol. 28, pp. 55-61, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.002>

M. Ratner y M. Tiemann, “An overview of unconventional oil and natural gas: Resources and federal actions,” *Congressional Research Service*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://fas.org/sgp/crs/misc/R43148.pdf>

M. Guarnone, F. Rossi, E. Negri et al., “An unconventional mindset for shale gas surface facilities,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 6, pp.14-23, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2012.01.002>

J. Bocora, “Global Prospects for the Development of Unconventional Gas,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 65, pp. 436-442, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.11.145>

J. Matesanz, “Repercusiones territoriales de la fractura hidráulica o “fracking” en Cantabria, Burgos y Palencia. Los permisos de investigación Bezana y Bigüenzo,” 2013. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.sim.ucm.es/23795/>

S. Jenner y A. J. Lamadrid, "Shale gas vs. coal: Policy implications from environmental impact comparisons of shale gas, conventional gas, and coal on air, water, and land in the United States," *Energy Policy*, vol. 53, pp. 442-453, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.010>

R. D. Vidic, S. L. Brantley, J. Vandenbossche et al., "Impact of Shale Gas Development on Regional Water Quality," *Science*, vol. 340, pp. 1-11, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1235009>

R. Weijermars, G. Drijkoningen, T. J. Heimovaara et al., "Unconventional gas research initiative for clean energy transition in Europe," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 402-412, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2011.04.002>

P. Peduzzi y R. Harding, "Gas fracking: ¿can we safely squeeze the rocks?," *Environmental Development*, vol. 6, pp. 86-99, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2012.12.001>

J. Soeder, S. Sharma, N. Pekney "An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States," *International Journal of Coal Geology*, vol. 126, pp. 4-19, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.01.004>

M. Kargbo, G. Wilhelm y J. Campbell, "Natural gas plays in the Marcellus shale: Challenges and potential opportunities", *Environmental Science & Technology*, vol. 44, no. 15, pp. 5679-5684, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es903811p>

N. R. Warner, R. B. Jackson, T. H. Darrah

"Geochemical evidence for possible natural migration of Marcellus Formation brine to shallow aquifers in Pennsylvania," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, no. 30, pp. 11961-11966, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1121181109>

C. G. Groat y T. W. Grimshaw. *Factbased regulation for environmental protection in shale gas development*. Austin: The Energy Institute, University of Texas at Austin, 2012.

T. Myers, "Potential contaminant pathways from hydraulically fractured shale to aquifers"

*Groundwater*, vol. 50 no. 6, pp. 872-882, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00933.x>

B. R. Scanlon, B. L. Ruddell, P. M. Reed et al., "The food-energy-water nexus: Transforming science for society," *Water Resources Research*, pp. 1-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017wr020889>

D. H. Nielson, "Method and apparatus for shale gas recovery. Google Patents," 1990. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/patents/US4928765>

J. P. Nicot y B. R. Scanlon, "Water use for shale-gas production in Texas, U.S.," *Environmental science and technology*, vol. 46, no. 6, pp. 3580-3586, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/es204602t>

The Water?Energy Nexus of Hydraulic Fracturing: A Global Hydrologic Analysis for Shale Oil and Gas Extraction. Lorenzo Rosa, Maria Cristina Rulli, Kyle Frankel Davis and Paolo D'Odorico. AGU Earth's Future

revista semana. (2016). "Fracking: una apuesta riesgosa para Colombia" semana.com. Recuperado de <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/fracking-una-apuesta-riesgosa-para-colombia/35505>

MEHTA, Neha y O'SULLIVAN, Francis. –Water management in unconventional oil and gas development—the issues and their optimization. En: FOOD, ENERGY, AND WATER. p. 217-241

GÓMEZ ACOSTA, C. A. (2016). ALTERNATIVAS PARA LA MINIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA EN LAS OPERACIONES DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO EN LA EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES. Recuperado 16 de mayo de 2020, de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/639/1/5101422-2016-2-GA.pdf>

Albert, L. A. (2018, enero 26). El fracking y sus consecuencias en el ambiente. Recuperado de <https://ecologica.jornada.com.mx/2018/01/26/el-fracking-y-sus-consecuencias-en-el-ambiente-865.html>

Technical Report, 2006. Material Risk – Ageing Offshore Installations. Petroleum Safety Authority Norway (PSA). Report Nro 3496.

van der Tuuk Opedal, Nils et al., 2013. Potential Leakage Paths along Cement-Formation Interfaces in Wellbores; Implications for CO2 Storage. Science Direct.

Vengosh, Avner et al., 2011. A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. Environmental Science & Technology. Critical Review. August, USA.

gzulma1@hotmail.com. (2016, octubre 13). Estallando el océano. Recuperado de <https://www.opsur.org.ar/blog/2016/10/12/estallando-el-oceano/>

Zhou, Jinhui , Guo, Y., & Zhang, J. (2019, agosto 21). Fracturing with Carbon Dioxide: From Microscopic Mechanism to Reservoir Application. Recuperado de <https://secure.jbs.elsevierhealth.com/action/cookieAbsent?code=null>