

# Impacto ambiental de la fracturación hidráulica empleada en los Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS) y la Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR)

Alumna: Pasante IQ Karla Cristina Serralde Ramírez.  
Tutora: Dra. Ma. Teresa de J. Rodríguez Salazar.

1

Facultad de Química. UNAM  
Departamento de Química Analítica



# OBJETIVOS

- ▶ Realizar una investigación bibliográfica en fuentes especializadas nacionales e internacionales, para conocer los impactos ambientales de la fracturación hidráulica, utilizada en sistemas EOR y EGS.
- ▶ Identificar las áreas de oportunidad para implementar políticas públicas que reduzcan los riesgos del uso del fracking; considerando el aumento del uso de dicha técnica por la Reforma Energética (en el sector hidrocarburos y en geotermia).



# INTRODUCCIÓN



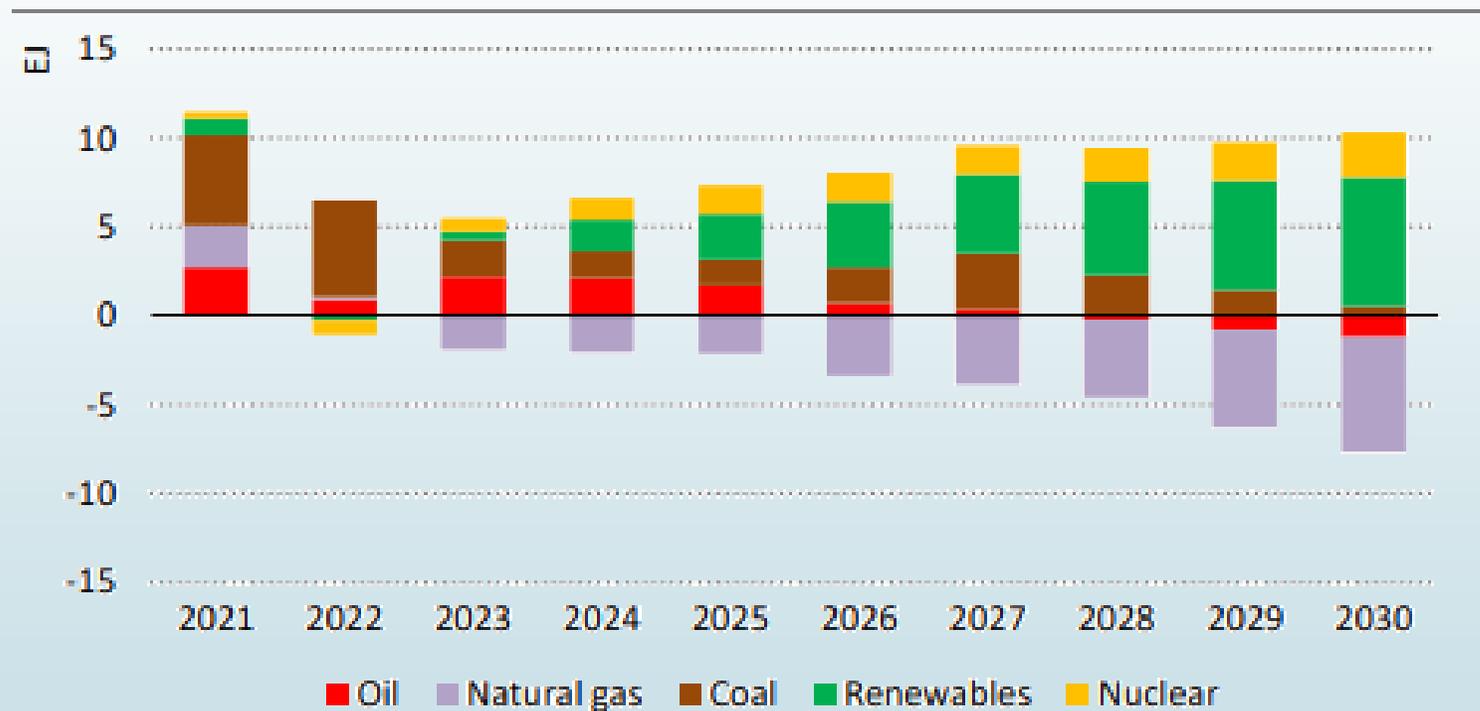
## DEFINICIONES

- **Impacto ambiental.** Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza (SEMARNAT, 2014).
- **Renovable.** Estado que describe la característica del recurso en su estado natural, que puede ser regenerado por procesos naturales (OECD, 2001).
- **Contaminación:** La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.
- **Análisis de Ciclo de Vida (ACV):** Metodología para identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio.



# Consumo actual de energía en el mundo

❖ Reducción de demanda mundial de energía en 2023.



IEA. CC BY 4.0.

Gráfico 1. Demanda mundial total de energía combustible 2021 - 2030 (IEA, 2020)

\* EJ: Exajoules

# Consumo actual de energía en México

- ❖ 2019 – 8 811 PJ
- ❖ 2020 – 7 827 PJ ↓
- ❖ 2021 – 10 370 PJ ↑

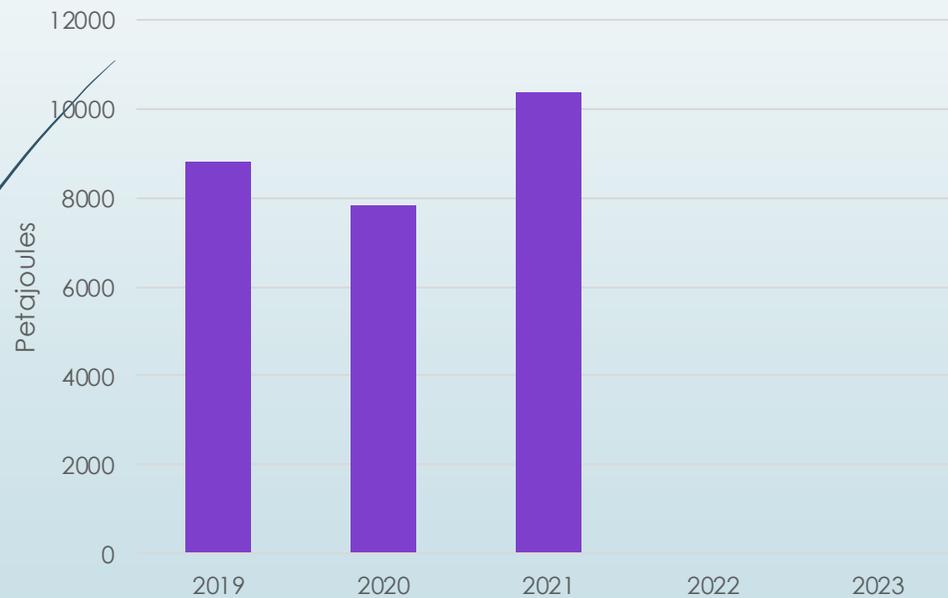


Gráfico 2. Consumo nacional de energía, 2019-2023 (SENER, 2023)

\* PJ: Petajoules. 1 PJ =  $10^{15}$  J

- 2021
- ❖ Carbón 64 PJ ↑
  - ❖ Renovables 288 PJ ↓
  - ❖ Petrolíferos 3 322 PJ ↑
  - ❖ Gas seco 425 PJ ↓

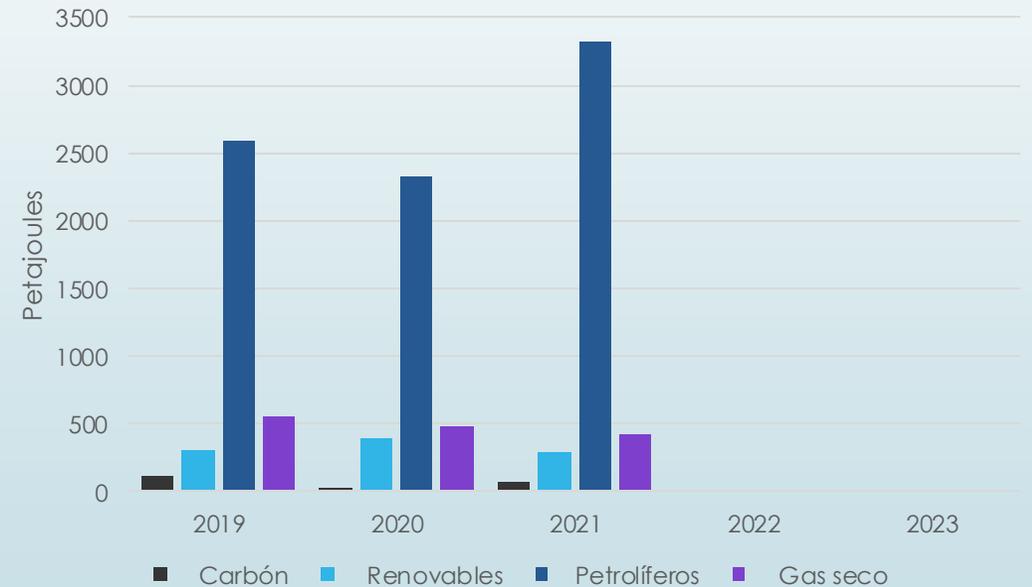


Gráfico 3. Consumo energético por combustible, 2019-2023 (SENER, 2023)

# Hidrocarburos

- Compuestos orgánicos formados por cadenas de carbono e hidrógeno originados en el subsuelo terrestre por transformación química de la materia orgánica depositada con rocas sedimentarias de grano fino en el pasado geológico.
- Principal fuente de generación de energía en el mundo.
- Hay dos tipos de yacimientos: Convencionales y No Convencionales.

Tabla 1. Tipo de yacimientos de hidrocarburos

CONVENCIONALES	NO CONVENCIONALES
Existencia de una roca reservorio porosa y permeable para la acumulación de hidrocarburos.	Existencia de una roca reservorio de muy baja porosidad y permeabilidad.
Acumulación relacionada a una trampa con una roca impermeable que evita su fuga.	No necesita de una trampa para su acumulación, debido a que los hidrocarburos se alojan en la roca madre.
Normalmente presentan dentro del reservorio un límite definido o una separación inferior, entre los hidrocarburos y el agua	No hay límites definidos entre los hidrocarburos y el agua en la roca que los aloja
Normalmente no necesitan estimulaciones (mejora artificial de la permeabilidad) para producir. Cuando lo requieren es a una escala mucho menor que la de los no convencionales.	Necesitan estimulación artificial para producir (fracturación) de gran envergadura.
Predominan los pozos verticales sobre los horizontales	Mejor producción con pozos horizontales

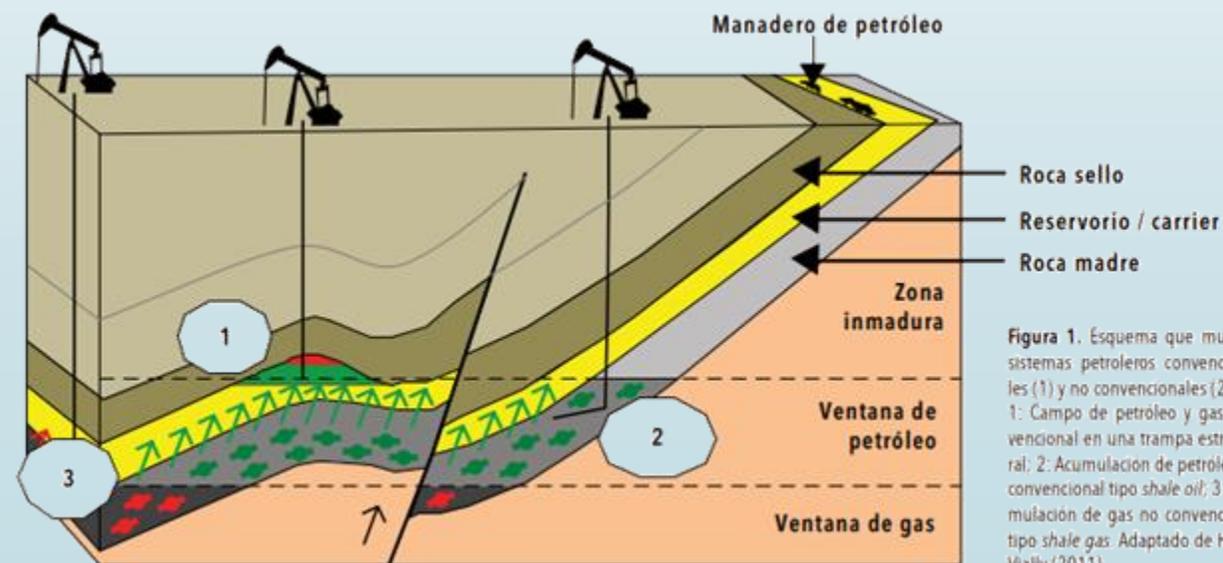
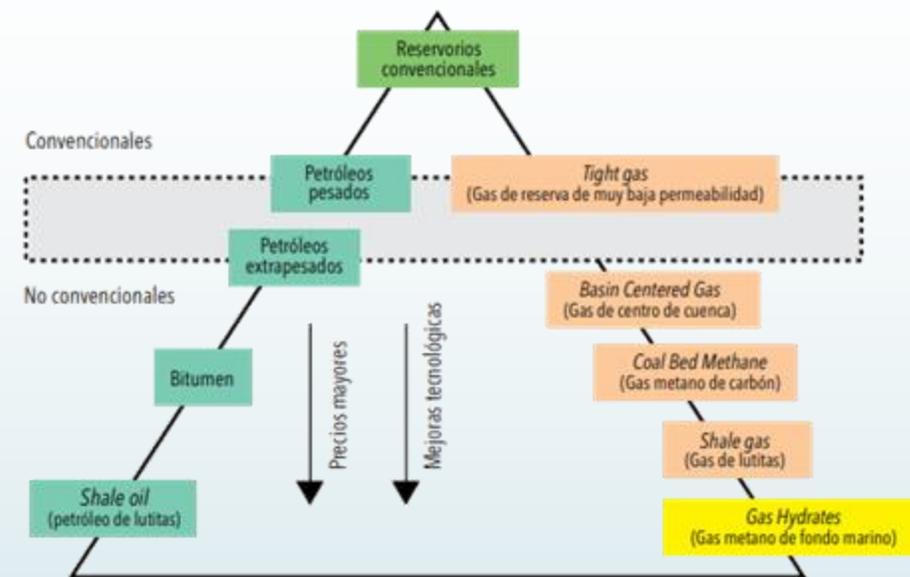


Figura 1. Esquema que muestra sistemas petroleros convencionales (1) y no convencionales (2 y 3). 1: Campo de petróleo y gas convencional en una trampa estructural; 2: Acumulación de petróleo no convencional tipo shale oil; 3: Acumulación de gas no convencional tipo shale gas. Adaptado de Huc & Vially (2011).

# Energía geotérmica

- ▶ La **geotermia** es la energía que produce el calor de la Tierra y que resulta en la expulsión de aguas termales o géiseres (SEMARNAT, 2015).
- ▶ Es considerada como una energía renovable porque el agua utilizada puede **reinyectarse** al **subsuelo** y **garantizar** la **sustentabilidad** del recurso.
- ▶ El calor contenido en los materiales que componen el NÚCLEO y el MANTO se transmite paulatinamente a la CORTEZA generando un flujo ascendente de calor que luego de atravesarla y alcanzar la superficie terrestre se disipa en la atmósfera.
- ▶ Por regla general, la temperatura aumenta en un valor promedio de 3°C por cada 100 metros de profundidad. Esta variación se conoce como **gradiente geotérmico**.
- ▶ La energía geotérmica llega a **yacimientos geotérmicos**, que pueden ser de roca húmeda o de roca seca. Los yacimientos que tienen mayor utilidad son los de roca húmeda, ya que dentro del mismo, a partir de la existencia de una capa sello, el agua de un manto subterráneo es calentada.
- ▶ Al fluido que es calentado se le conoce como **fluido geotérmico**. Puede ser agua, vapor de agua, o una mezcla de ambos, y normalmente es rico en sales y minerales como boro y sílice.

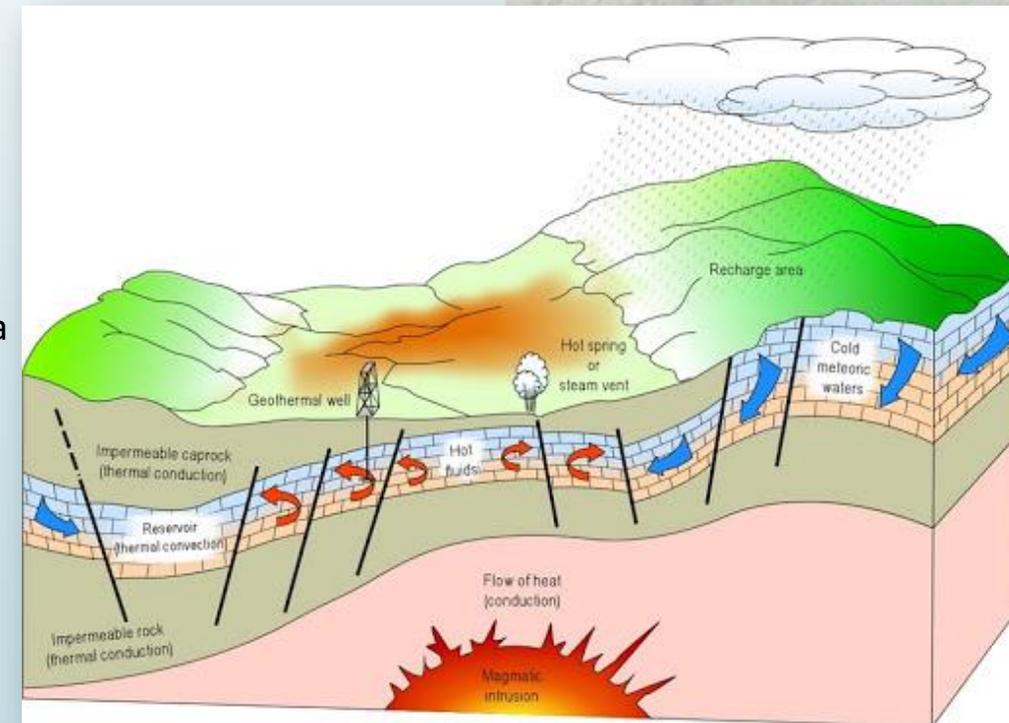


Fig. 2 Yacimiento geotérmico (Dickson & Fanelli, 2004)

# Recuperación Mejorada del Petróleo (EOR)

- La vida de un pozo de producción tiene 3 fases principales:
- Recuperación Primaria.** Se utiliza la presión natural del yacimiento para la extracción del hidrocarburo, la cual es producida por el gas ya existente en condiciones naturales.
- Recuperación Secundaria.** Una vez agotada la presión natural del yacimiento se mantiene la presión mediante la inyección de agua o gas.
- Recuperación Terciaria.** En esta etapa se introducen fluidos que pueden reducir la viscosidad del aceite y mejorar el flujo del crudo, generalmente son gases miscibles con el aceite como el  $\text{CO}_2$  y otros agentes como el vapor, oxígeno, soluciones con polímeros, gel, surfactantes, etc.
- La **Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR)**, por sus siglas en inglés) es el resultado de la inyección de materiales que normalmente no están presentes en el yacimiento, o que ya se encuentran ahí pero que son inyectados a condiciones específicas con el fin de alterar el comportamiento fisicoquímico de los fluidos del yacimiento y de la interacción de dichos fluidos con la roca. Abarca diferentes procesos de recuperación (desplazamientos e intervenciones a pozo), y considera diferentes sustancias (Lake, 1989).

Tabla 2. Clasificación EOR

Clasificación EOR	Proceso
Termal	Vapor Combustión in situ Agua (caliente)
Químico	Polímero micelar Polímero Alcalinos
Solventes	Hidrocarburos miscibles $\text{CO}_2$ Nitrógeno Gases de combustión



# Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS)

- Los **Sistemas Geotérmicos Estimulados** (EGS, por sus siglas en inglés) consisten en extraer calor de roca que no se ha fracturado naturalmente, donde la permeabilidad es generalmente baja (Olasolo, 2015).
- Principalmente se trata de explotar el calor de la roca mediante el uso de agua como fluido de trabajo: esta agua se bombea a través de áreas de roca caliente para que se intercambie el calor.

Etapas de un EGS:

**A.** Un pozo de inyección es perforado en un basamento de alta temperatura, de baja permeabilidad y con poca cantidad de fluidos.

**B.** Se inyecta agua con suficiente presión para asegurar un nuevo fracturamiento o la apertura de las fracturas existentes.

**C.** Se continúa el bombeo de agua al interior del reservorio para expandir las fracturas.

**D.** Un pozo de producción es perforado con la intención de interceptar el sistema de fracturas para extraer el calor del yacimiento estimulado.

**E.** Pozos de producción adicionales son perforados para extraer grandes volúmenes de calor y utilizar estos recursos para la generación eléctrica, entre otros usos (tomado y modificado de [U.S. Department of Energy, 2004](#)).

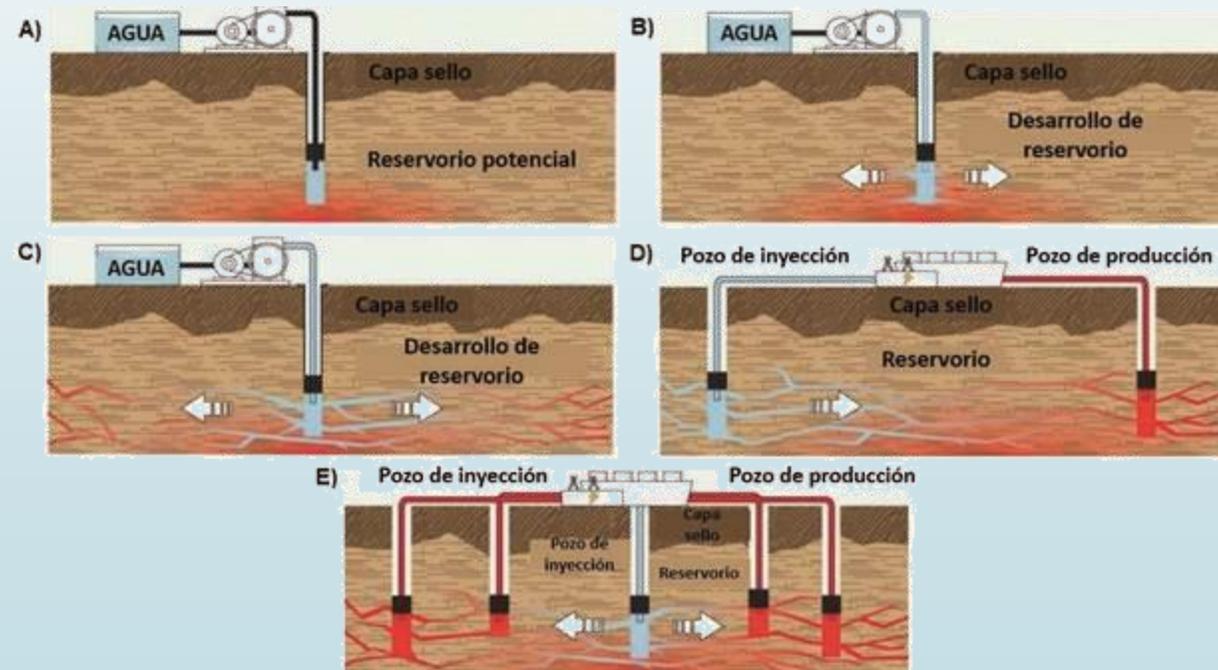


Fig. 3 Etapas de un EGS

# FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

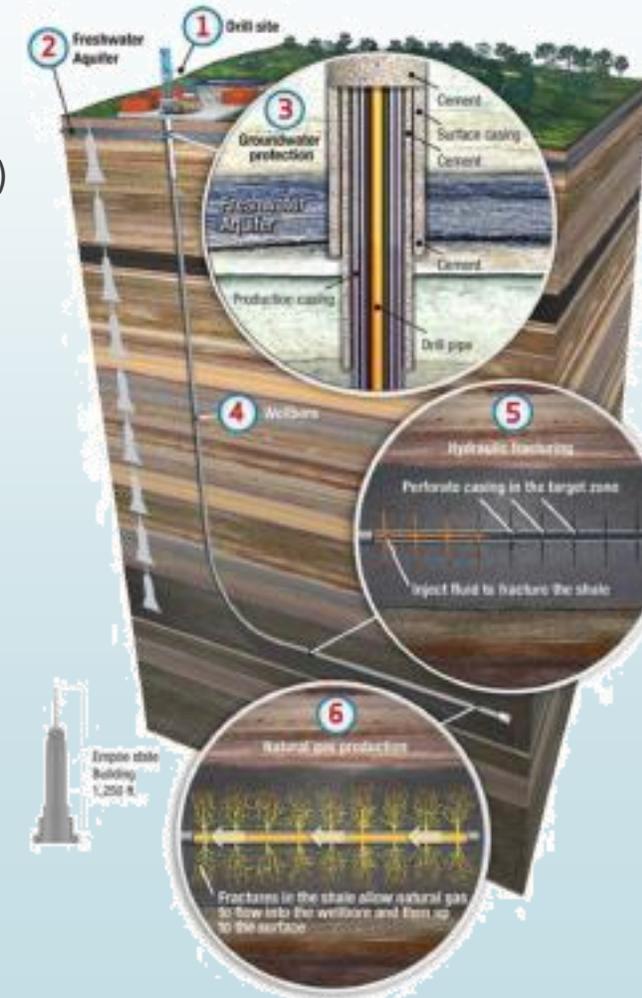
- Los sistemas EGS y EOR requieren la perforación a grandes profundidades y creación de fracturas en la formación geológica impermeable. Para esto, se requiere la ayuda de la técnica de Fracturación Hidráulica.
- Consiste en crear canales de flujo desde la formación al pozo para mejorar la productividad de los mismos. Lo anterior se logra mediante el bombeo a alta presión de fluidos fracturantes, compuestos de agua, arena, surfactantes, ajustadores de pH, inhibidores, gelificantes, ácidos y biocidas (pozos EOR) o de agua (pozos geotérmicos), los cuales abrirán la fractura. Estos fluidos transportan el agente apuntalante (como bauxita, circonio o caolín), el cual mantendrá abierta la fractura cuando se complete el tratamiento.

Tabla 3. Principales componentes y porcentajes de composición de un típico fluido de fracturación hidráulica

COMPONENTE	COMPOSICIÓN (%)
Agua	99 – 98
Apuntalante	1.0 – 1.9
Reductores de fricción	0.025
Surfactante	0.05 – 0.2
Inhibidor de corrosión	0.2 – 0.5
Desinfectante (biocida)	0.005 – 0.05

Tabla 4. Aditivos químicos más usados para procesos de fracturación hidráulica

COMPONENTE	FUNCIÓN
Metanol	Surfactante
Isopropanol	Surfactante
Sílice cristalina	Apuntalante
Etilenglicol monobutil éter	Surfactante
Etilenglicol	Inhibidor de precipitaciones
Destilados de petróleo ligeros hidrotratados	Reductor de fricción
Hidróxido de sodio	Ajustador de pH



# METODOLOGÍA



# TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

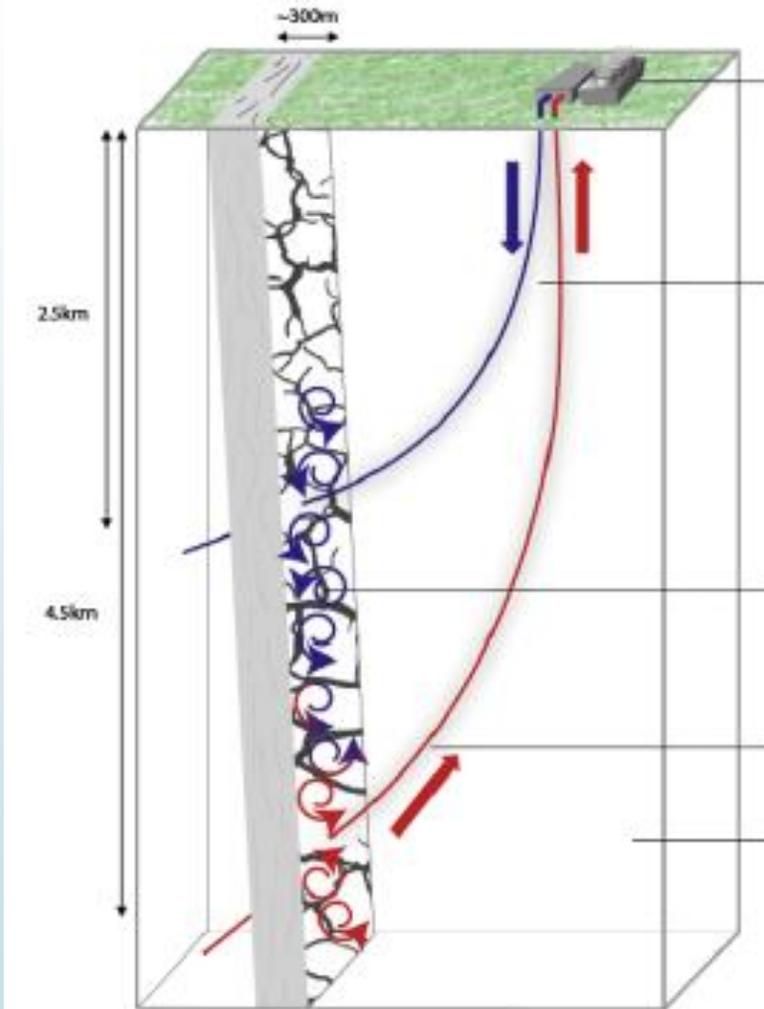


# RESULTADOS



## Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project (Paulillo, A., et. al, 2019)

- El estudio se lleva a cabo en una planta Geotérmica del país de Cournalles del Reino Unido.
- Presenta un estudio de evaluación del ciclo de vida:
  - i) Identificando en el ciclo de vida los impactos ambientales para la producción en la planta.
  - ii) Comparando el desempeño de la operación con otras fuentes de energía clave en el país.



**Fig. 1.** Schematic of the UDDGP concept detailing the configuration of the two deep deviated wells intersecting the Porthowan Fault Zone at 2.5 and 4.5 km. The injection well is in blue and the production one in red. (Ledingham et al., 2019) (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

# Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project (Paulillo, A., et. al, 2019)

Tabla 5. Materiales clave para la perforación y terminación de pozos geotérmicos

		INJECTION	PRODUCTION	PRODUCTION LEG2*
Fuel	GJ/m	7.23	7.23	7.23
Cement <sup>1</sup>	kg/m	42.32	16.02	8.70
Steel	kg/m	84.30	76.46	46.83
Drilling mud <sup>b</sup>	m <sup>3</sup> /m	0.54	0.51	0.65
Drilling waste	ton	1143	1807	610

Notes.<sup>1</sup>Here we only report consumption of cement, which is mixed with other components (according to the ratios included in Paulillo et al., 2019c) to make concrete.<sup>2</sup>The consumption of drilling mud refers to that of its main component: water.

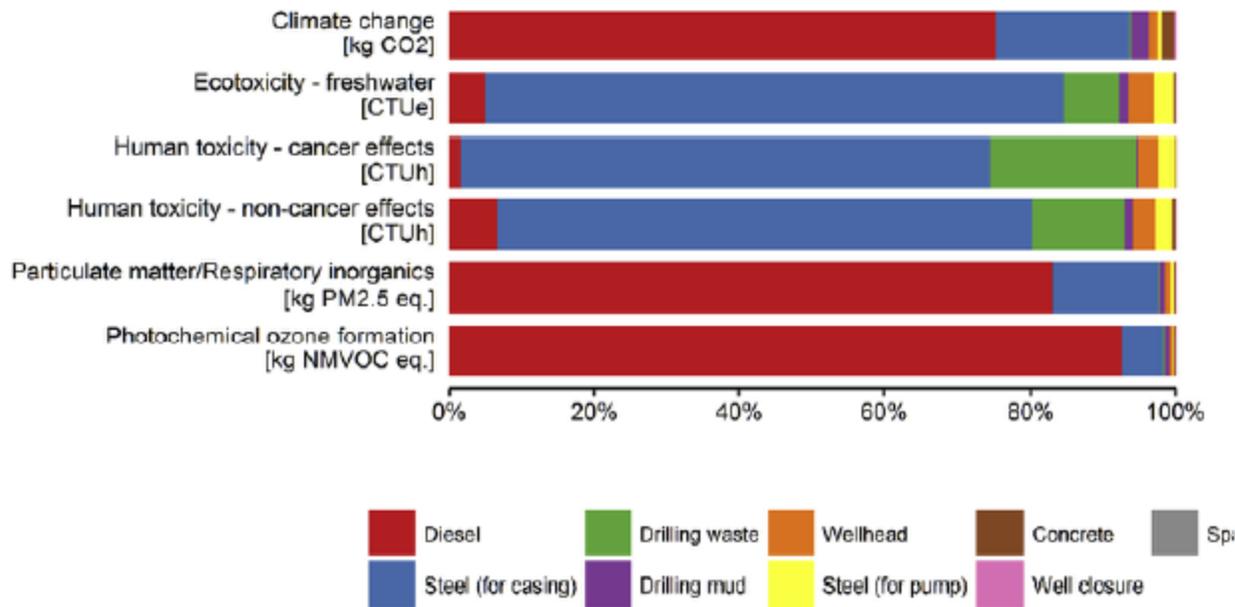


Gráfico 4. Contribución de impactos durante el ciclo de vida, incluida la construcción y el desmantelamiento

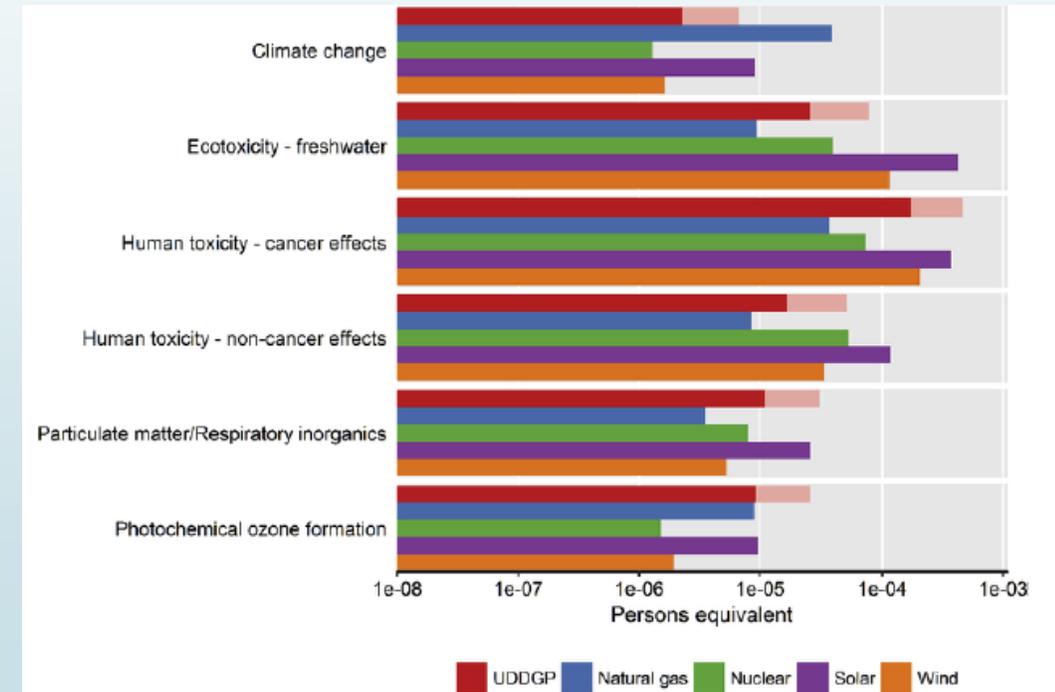


Gráfico 5. Comparación de los impactos medioambientales normalizados de 1kW de electricidad producida por la planta, en comparación a la producida por plantas de otros tipos de energía.

## Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project (Paulillo, A., et. al, 2019)

### CONCLUSIONES:

- ❖ El análisis reveló que la mayor proporción de impactos ambientales se origina en la fase de construcción, en particular del acero utilizado para la carcasa de pozo y el diésel consumido durante la perforación.
- ❖ Los resultados permitieron comparar el desempeño ambiental de la geotérmica con otras fuentes de energía. Con base en los resultados, la energía geotérmica es la tercera opción más benigna ambientalmente hablando después de la energía nuclear y la energía eólica, si el objetivo final es reducir las emisiones de carbono.



## Environmental impacts of hydraulic fracturing in shale gas development in the United States (Dongxiao, Z., et. al., 2016)

- El artículo muestra una investigación de los problemas ambientales de la fracturación hidráulica en los EE. UU.
- La investigación proporciona una referencia para el desarrollo y la gestión del gas de esquisto en China.

Posibles riesgos de contaminación del agua asociados con el desarrollo de gas de esquisto:

1. Uso excesivo de agua que conduce al agotamiento y degradación de la calidad del agua
2. Contaminación de aguas subterráneas superficiales y poco profundas debido a derrames y fugas del almacenamiento de agua y pozos.
3. Eliminación de aguas residuales de tratamiento inadecuado que conducen a la contaminación de arroyos y suelos;
4. Fugas de estanques de almacenamiento utilizados para inyección en pozos profundos.
5. Contaminación de acuíferos poco profundos por gas, fluido de fracturación y agua producida que se escapa de la tubería de revestimiento.
6. Contaminación de acuíferos poco profundos por fugas de gas disperso desde el revestimiento de pozos convencionales de petróleo y gas o pozos abandonados
7. Gas disperso puede filtrarse por la tubería de revestimiento dañada.
8. Gas disperso de un pozo abandonado, puede filtrarse y contaminar el acuífero poco profundo.
9. Gas y agua de formación salina migra directamente de la formación de lutitas a los acuíferos poco profundos.
10. Contaminación de acuíferos poco profundos por fugas de pozos de inyección.

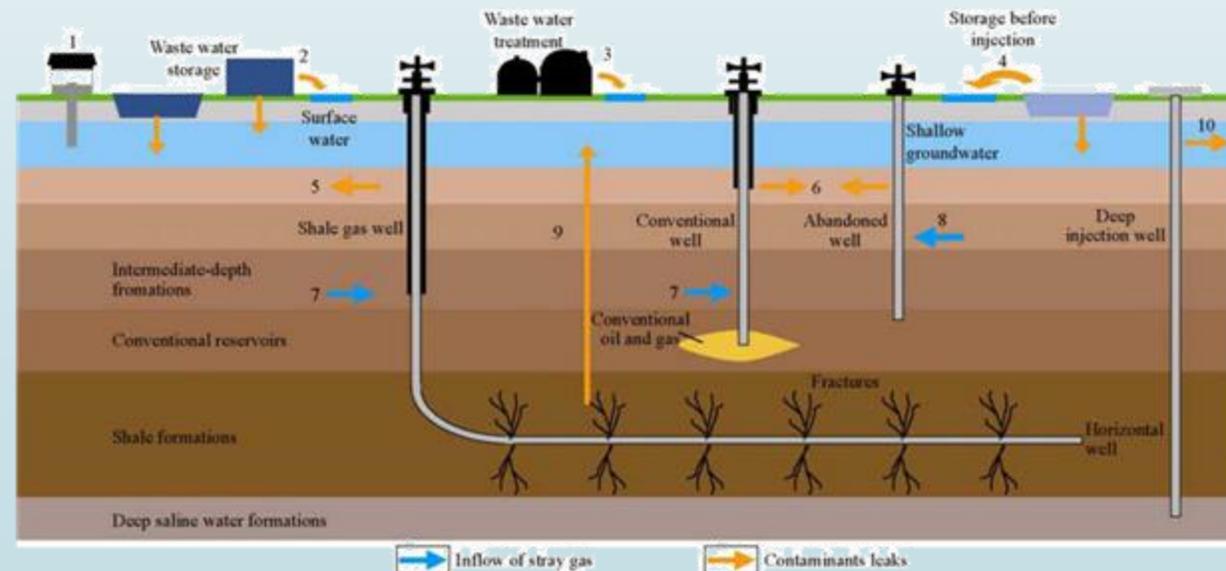


Fig. 4 Riesgos de contaminación del agua

## Environmental impacts of hydraulic fracturing in shale gas development in the United States (Dongxiao, Z., et. al., 2016)



### CONCLUSIONES:

- ❖ Aunque el consumo de agua de un solo pozo de gas de esquisto es alto, es menor que la del petróleo convencional.
- ❖ La extracción de agua se concentra en la etapa inicial de terminación del pozo.
- ❖ No se tienen los datos suficientes para determinar fugas de metano o migración a acuíferos poco profundos.
- ❖ Para evaluar los impactos del desarrollo de gas de esquisto, es necesario realizar un seguimiento continuo para identificar la fuente de contaminantes a través de indicadores geoquímicos y firmas isotópicas.
- ❖ Los datos microsísmicos revelan que es poco probable que las fracturas hidráulicas se extiendan a acuíferos poco profundos desde las formaciones de lutitas. Sin embargo, los factores que afectan el destino del fluido de fracturación aún deben entenderse mejor.
- ❖ En comparación con los riesgos de fugas y movimientos del subsuelo, los impactos y tratamientos de los residuos son problemas más serios que necesitan más estudio y evaluación, incluidas firmas geoquímicas, plan de monitoreo e indicadores.
- ❖ Es poco probable que la fracturación hidráulica induzca terremotos destructivos, y los casos de fracturación hidráulica que indujeron terremotos de magnitud superior a 3 probablemente fueron causados por fallas preexistentes desconocidas.
- ❖ Es necesario realizar más estudios de los mecanismos de desarrollo de las fracturas, los impactos de los fluidos de fracturación inyectados y el agua sobre el estrés in situ y los terremotos.
- ❖ La estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de un pozo de gas de esquisto varía mucho en la literatura existente.

## A life-cycle analysis of deep enhanced geothermal systems - The case studies of Reykjanes, Iceland and Vendenheim, France (Sigurjónsson, et. al., 2021)

- El artículo evalúa el impacto ambiental expresado con la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos en dos proyectos EGS, utilizando el análisis de ciclo de vida realizado con base en las normas ISO 14040 e ISO 14044.
- Uno de los estudios se realizó en Reykjanes, Islandia, donde se perforó un pozo a una profundidad de 4.6 km con el fin de producir electricidad adicional de una planta de energía existente.
- El otro estudio fue de dos pozos (profundidad > 5000 m) perforados para dar servicio a una planta de cogeneración de calor y electricidad ubicada en un antiguo campo petrolero en Vendenheim, Francia.
- Los puntos críticos de los impactos del ciclo de vida para el caso de Reykjanes se dividen de la siguiente manera: cambio climático (45%); formación de partículas (29%); acidificación del suelo (14%); y toxicidad humana (8%).
- Para el caso de estudio Vendenheim, los puntos críticos de los impactos del ciclo de vida se dividen de la siguiente manera: formación de partículas (30%); toxicidad humana (25%); cambio climático (14%); radiación ionizante (13%); acidificación del suelo (8%); y ecotoxicidad terrestre (5%)

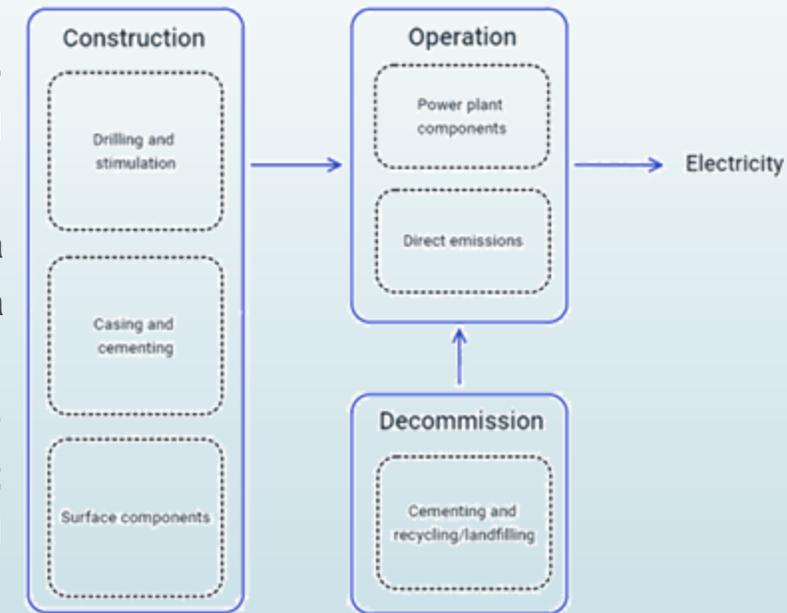


Fig. 5 Diagrama de los principales procesos del caso de estudio

# A life-cycle analysis of deep enhanced geothermal systems - The case studies of Reykjanes, Iceland and Vendenheim, France (Sigurjónsson, et. al., 2021)

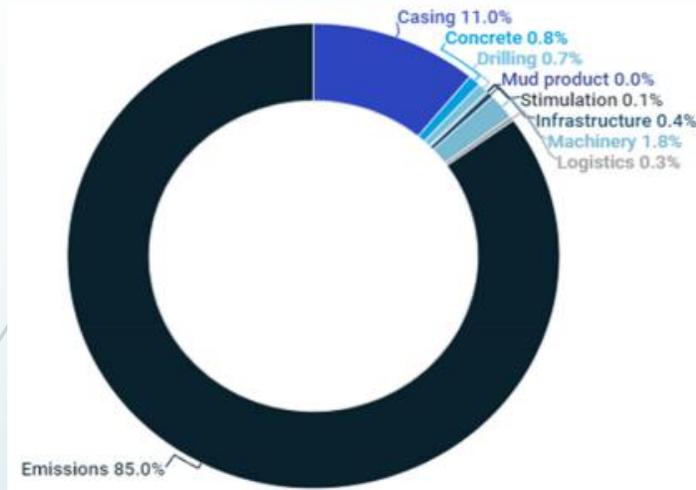


Fig. 6 Distribución del impacto del cambio climático del caso de estudio de Reykjanes

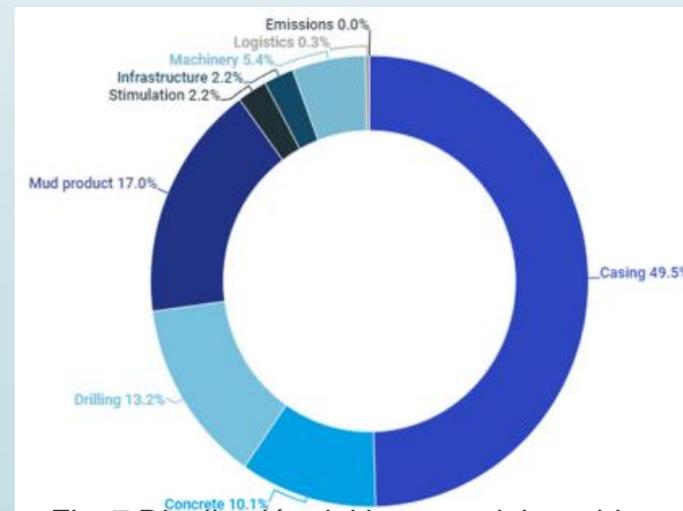


Fig. 7 Distribución del impacto del cambio climático del caso de estudio de Vendenheim

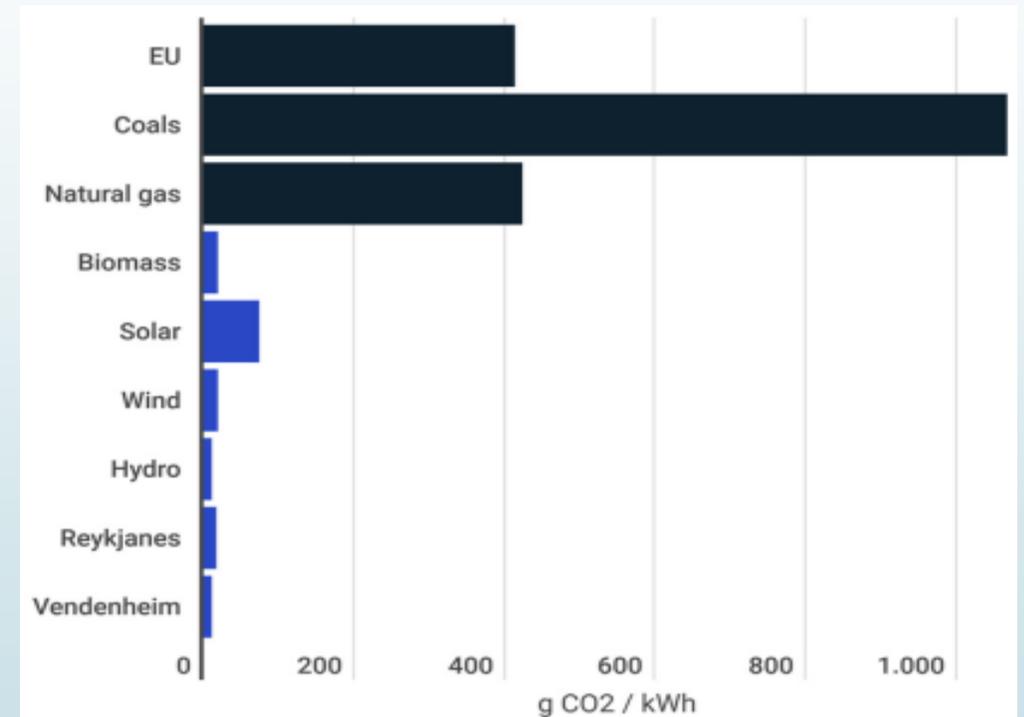


Fig. 8 Impacto en el cambio climático de alternativas de producción de electricidad



## CONCLUSIONES

- Las emisiones de gases de efecto invernadero de los proyectos EGS lo largo de su ciclo de vida son considerablemente más bajas que las alternativas de combustibles fósiles para la generación de electricidad, y similares en emisiones por unidad de energía a las alternativas de energía renovable como la energía hidroeléctrica, eólica y biomasa.
- Los impactos del cambio climático para los sitios se estimaron en el rango de 1.6 a 17.4 gCO<sub>2</sub>e/kWh y de 6.9 a 13.9 gCO<sub>2</sub>e/kWh para Reykjanes y Vendenheim, respectivamente.
- Como opciones para reducir las emisiones de efecto invernadero en Reykjanes se recomienda la captura de carbono y la mineralización del dióxido de carbono.
- Para el proyecto de Vendenheim se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al adoptar los principios de economía circular en la adquisición de materiales, ya que la mayoría de los impactos climáticos se derivan de los materiales y la energía utilizados en la construcción

## Life-cycle climate-change impact assessment of enhanced geothermal system plants in the Upper Rhine Valley (Pratiwi, et. Al., 2018)

- En este artículo se analizan y cuantifican las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la planta geotérmica Rittershoffen en Francia, un proyecto EGS operativo desarrollado en Upper Rhine Valley, esta planta ha contribuido con el 25% de la energía requerida por la fábrica productora de almidón “Roquette Frères” (Baujard et al., 2017).
- También se presenta un análisis similar para un proyecto de una planta de cogeneración EGS en Illkirch Graffenstaden (Estrasburgo) (Richard et al., 2016). El objetivo de esta planta es proporcionar electricidad y suministrar calor a la red de calefacción urbana de la comunidad cercana.
- Se analizan cinco escenarios diferentes: S1 representa la planta Rittershoffen real. S2 es un caso hipotético de una planta ORC (Ciclo de Rankine Orgánico) para producir electricidad en vez de suministrar calor industrial, empleando el calor geotérmico de los mismos pozos. S3–S5 se basan en el Illkirch. S3 considera producir electricidad pura usando ORC, S4 y S5 consideran producir electricidad usando ORC y calor con diferentes distribuciones.

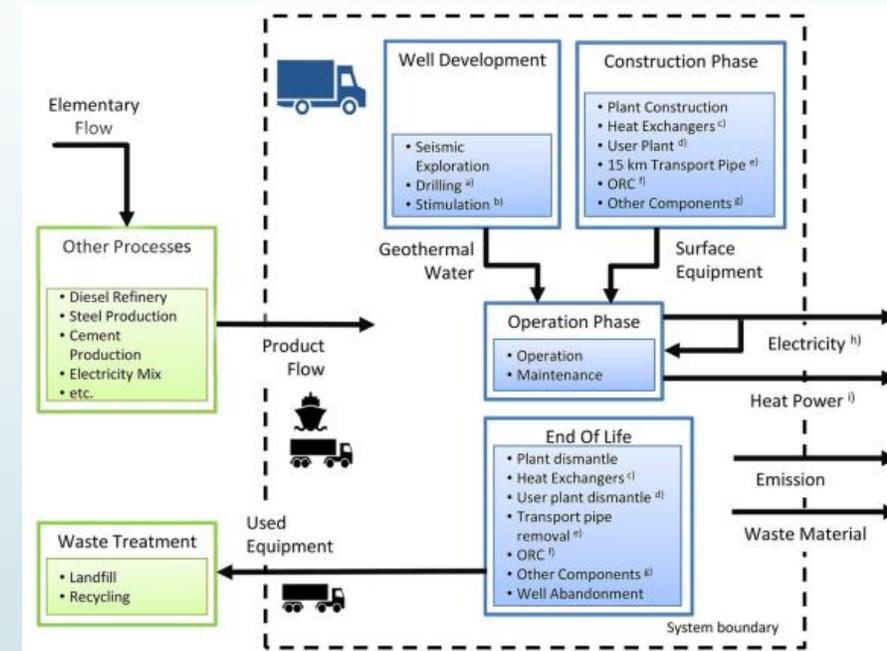


Fig. 9 Límites del sistema para el Análisis del ciclo de vida

# Life-cycle climate-change impact assessment of enhanced geothermal system plants in the Upper Rhine Valley (Pratiwi, et. Al., 2018)

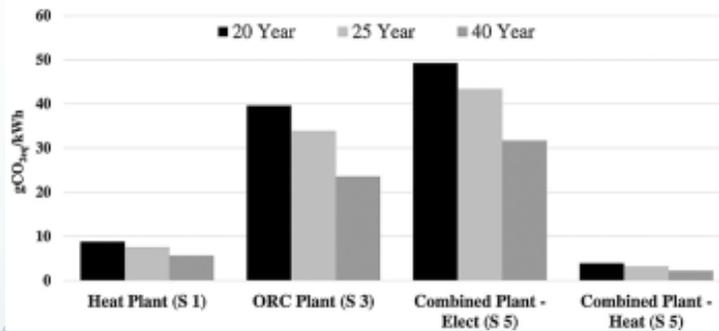


Fig. 10 Impacto del tiempo de vida a las emisiones GEI

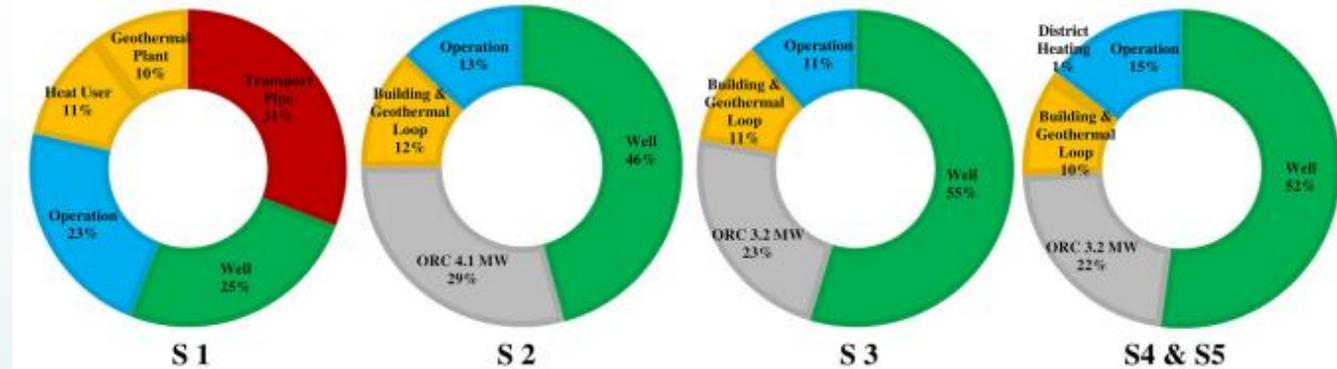


Fig. 11 Punto críticos por escenarios

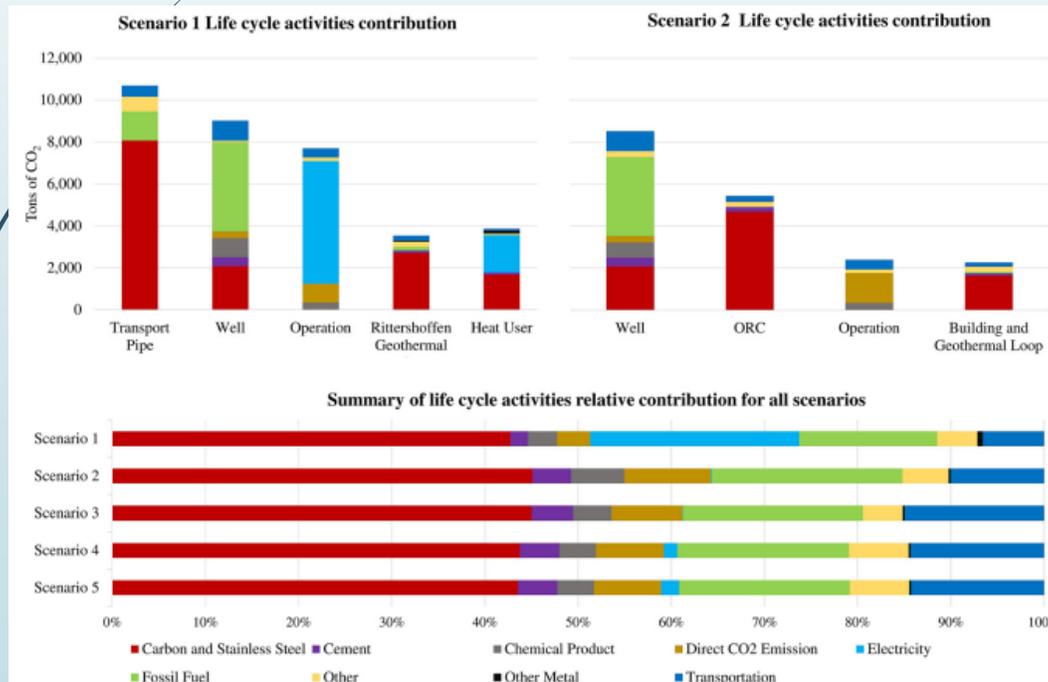


Fig. 12 Contribución de las categorías de procesos a las emisiones de GEI

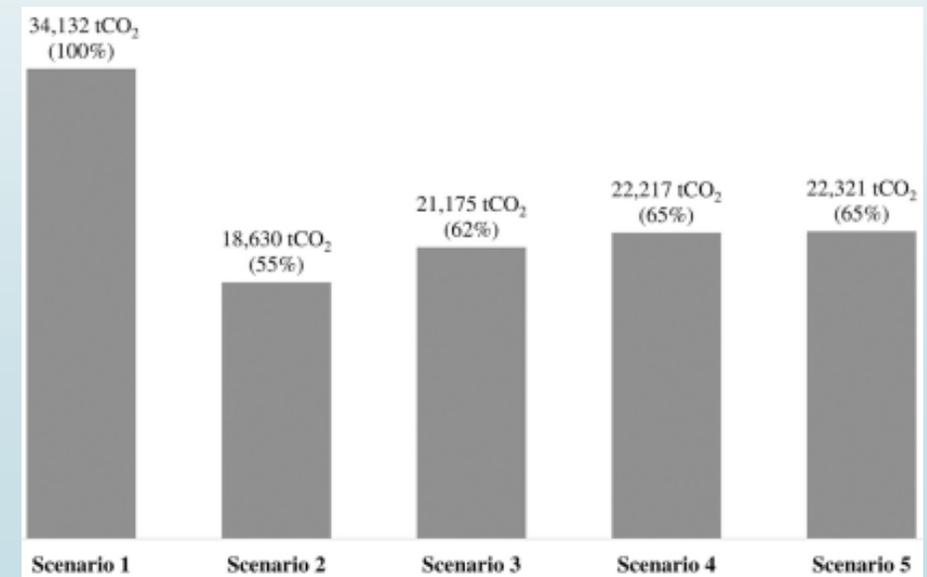


Fig. 13 Comparación de emisiones GEI por escenario

## Life-cycle climate-change impact assessment of enhanced geothermal system plants in the Upper Rhine Valley (Pratiwi, et. Al., 2018)

### CONCLUSIONES:

- La planta Rittershoffen en funcionamiento emite entre 6.97 y 9.15 gCO<sub>2</sub>eq/kWh a lo largo de sus 25 años de vida útil. Se calcula que la próxima planta, Illkirch-Graffenstaden, emitirá de 2.69–4.39 gCO<sub>2</sub>eq/kWh.
- El estudio muestra que, para todos los escenarios, cuanto mas sea la vida útil de la planta, menos gCO<sub>2</sub>eq se emiten por kWh.
- En el desarrollo de los pozos es cuando se tienen mayores emisiones de GEI. Sin embargo, cuando se requiere tubería de transporte, las emisiones de su construcción podrían exceder las del desarrollo del pozo si la longitud es significativa.
- En términos de recursos, los productos metálicos son los que más contribuyen a las emisiones de GEI.



## Groundwaters in Northeastern Pennsylvania near intense hydraulic fracturing activities exhibit few organic chemical impacts (Xiong, et. Al., 2021)

- En este estudio se caracterizaron los contaminantes orgánicos en 90 pozos de agua subterránea y 4 manantiales en el noreste de Pensilvania después de diez años de fracturación hidráulica en la región.
- En esta región, se tienen más de 1000 pozos productores de gas no convencional desde 2008 y gran parte de la población rural depende de pozos privados para obtener agua potable.
- Se cuantificaron los compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos del rango de la gasolina y el diesel. De estos se tomó un subconjunto para evaluarlos cualitativamente utilizando cromatografía de gases bidimensional junto con espectrometría de masas de tiempo de vuelo (GC GC-TOF- EM).
- Posteriormente se calcularon las velocidades del agua subterránea con un modelo del flujo utilizando la simulación Monte Carlo para estimar el comportamiento de transporte de los contaminantes orgánicos

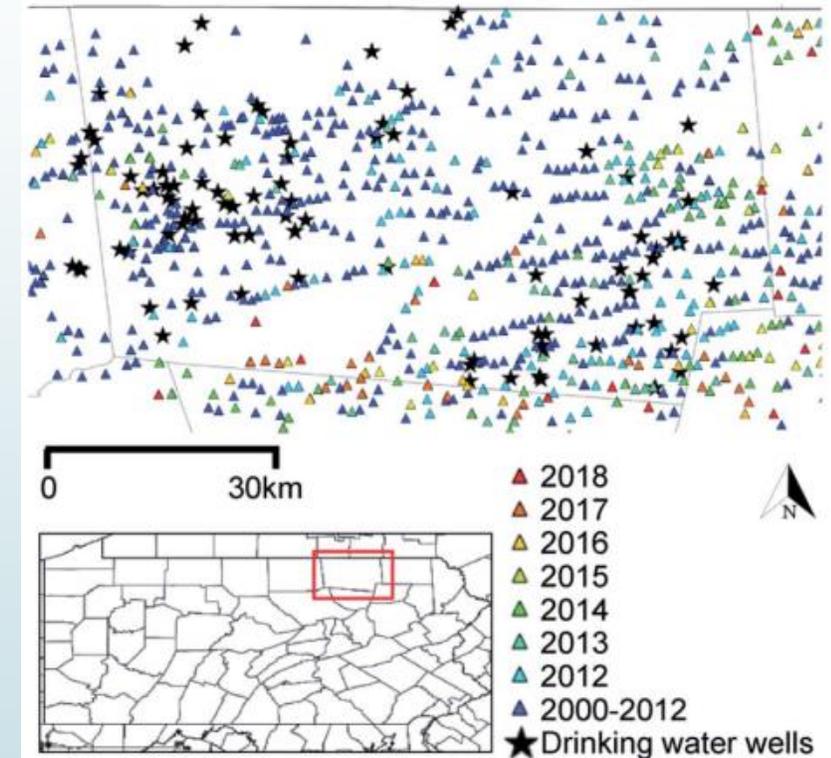


Fig. 14 Sitios de muestreo de pozos de agua subterránea y pozos de petróleo y gas no convencionales

## Groundwaters in Northeastern Pennsylvania near intense hydraulic fracturing activities exhibit few organic chemical impacts (Xiong, et. Al., 2021)

Compound name	EPA Maximum Contaminant Level (ppb)	Maximum concentration detected (ppb)	Limit of Quantification (LOQ, ppb)	% Occurrence (based on LOQ)
Bromochloromethane	N/A	1.18	0.17	99
Trichloroethene	5	4.11	0.05	54
Chloroform	70	0.63	0.18	35
Toluene	1000	0.26	0.05	28
Bromomethane	N/A	0.29	0.08	26
1,2-Dichloroethane & Benzene*	5	0.10	0.06	20

Tabla 6. Concentraciones de los compuestos detectados en el rango de gasolina detectados con mayor frecuencia

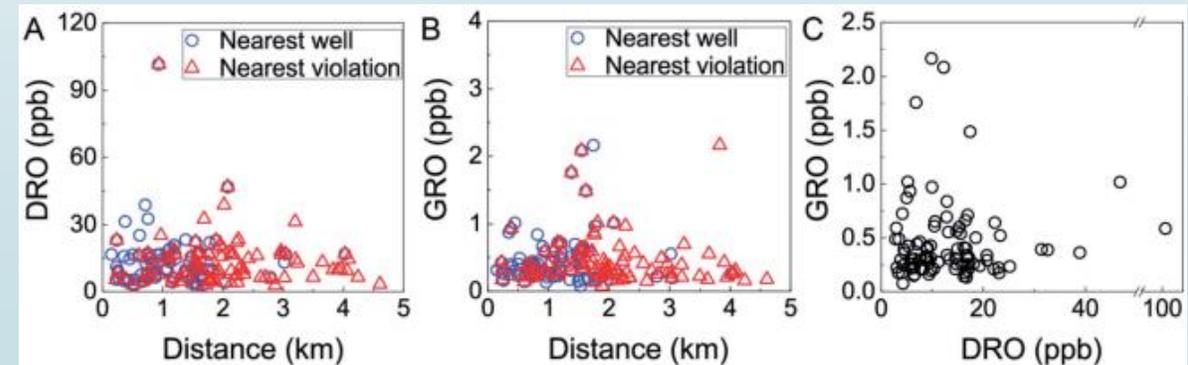


Fig. 15 Datos de proximidad DRO y GRO. (A) Compuestos orgánicos de rango diésel (DRO). (B) Compuestos orgánicos de rango de gasolina (GRO). (C) Correlación de GRO y DRO

\*DRO: Compuestos Orgánicos en el rango del diésel

\*GRO: Compuestos Orgánicos en el rango de gasolina

## Groundwaters in Northeastern Pennsylvania near intense hydraulic fracturing activities exhibit few organic chemical impacts (Xiong, et. Al., 2021)

### CONCLUSIONES:

- Las concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles encontrados en las muestras están por debajo del límite máximo permitido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- Al comparar los resultados con estudios previos en los mismos sitios se puede observar que con el paso del tiempo no hay un aumento o disminución sustancial en las concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles en los cuerpos de agua aledaños.
- En conclusión, las observaciones y los resultados sugieren baja probabilidad de contaminación orgánica del agua subterránea en la región. Sin embargo, los derrames accidentales de sustancias químicas comúnmente ocurren, aunque no se especifican.



# DISCUSIÓN



Autor y Año	Título	Tipo	Compartimiento ambiental afectado	Impactos ambientales reportados	Especies contaminantes	Conclusiones del artículo
Paulillo, et. Al. / 2019	Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project	EGS	Agua Aire Salud Humana	Cambio climático Ecotoxicidad Toxicidad en la salud humana Formación de ozono Formación de partículas	Diesel Acero Residuos Lodos de perforación Concreto CO <sub>2</sub>	<p>La mayor proporción de impactos ambientales se origina en la fase de construcción, en particular del acero utilizado para la carcasa de pozo y el diésel consumido durante la perforación.</p> <p>Los resultados permitieron comparar el desempeño ambiental de la geotérmica con otras fuentes de energía. Con base en los resultados, la energía geotérmica es la tercera opción más benigna ambientalmente hablando después de la energía nuclear y la energía eólica, si el objetivo final es reducir las emisiones de carbono.</p>
Dangxiao, et. Al. / 2016	Environmental impacts of hydraulic fracturing in shale gas development in the United States	EOR	Agua Suelo Paisaje Aire	Contaminación del agua Agotamiento del agua Sismos Contaminación del suelo Contaminación del aire	Combustibles fósiles Arsénico Selenio	<p>Aunque el consumo de agua de un solo pozo de gas de esquisto es alto, es menor que la del petróleo convencional.</p> <p>La extracción de agua se concentra en la etapa inicial de terminación del pozo.</p> <p>Los datos microsísmicos revelan que es poco probable que las fracturas hidráulicas se extiendan a acuíferos poco profundos desde las formaciones de lutitas.</p> <p>En comparación con los riesgos de fugas y movimientos del subsuelo, los impactos y tratamientos de los residuos son problemas más serios que necesitan más estudio y evaluación, incluidas firmas geoquímicas, plan de monitoreo e indicadores.</p> <p>Es poco probable que la fracturación hidráulica induzca terremotos destructivos, y los casos de fracturación hidráulica que indujeron terremotos de magnitud superior a 3 probablemente fueron causados por fallas preexistentes desconocidas.</p>

Autor y Año	Título	Tipo	Compartimiento ambiental afectado	Impactos ambientales reportados	Especies contaminantes	Conclusiones del artículo
Hafþór Ægir Sigurjónsson, David Cook, et. al. / 2021	A life-cycle analysis of deep enhanced geothermal systems e The case studies of Reykjanes, Iceland and Vendenheim, France	EGS	Suelo Aire Salud Humana Biota	Cambio climático Formación de partículas Acidificación del suelo Toxicidad en la salud humana Ecotoxicidad	Radiación ionizante CO <sub>2</sub> Lodos de perforación Concreto Acero Residuos	<p>Las emisiones de gases de efecto invernadero de los proyectos EGS lo largo de su ciclo de vida son considerablemente más bajas que las alternativas de combustibles fósiles para la generación de electricidad, y similares en emisiones por unidad de energía a las alternativas de energía renovable como la energía hidroeléctrica, eólica y biomasa. Los impactos del cambio climático para los sitios se estimaron en el rango de 1.6 a 17.4 gCO<sub>2</sub>e/kWh y de 6.9 a 13.9 gCO<sub>2</sub>e/kWh para Reykjanes y Vendenheim, respectivamente.</p> <p>Como opciones para reducir las emisiones de efecto invernadero en Reykjanes se recomienda la captura de carbono y la mineralización del dióxido de carbono. Para el proyecto de Vendenheim se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al adoptar los principios de economía circular en la adquisición de materiales, ya que la mayoría de los impactos climáticos se derivan de los materiales y la energía utilizados en la construcción.</p>
Xiong B., Soriano, M., et. al. / 2021	Groundwaters in Northeastern Pennsylvania near intense hydraulic fracturing activities exhibit few organic chemical impacts	EO R	Agua Salud Humana	Contaminación del agua Toxicidad en la salud humana	Bromoclorometano o Tricloroetano Cloroformo Tolueno Bromometano 1,2 Dicloroetano y Benceno	<p>Las concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles encontrados en las muestras están por debajo del límite máximo permitido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Al comparar los resultados con estudios previos en los mismos sitios se puede observar que con el paso del tiempo no hay un aumento o disminución sustancial en las concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles en los cuerpos de agua aledaños.</p> <p>En conclusión, las observaciones y los resultados sugieren baja probabilidad de contaminación orgánica del agua subterránea en la región. Sin embargo, los derrames accidentales de sustancias químicas comúnmente ocurren, aunque no se especifican.</p>

Autor y Año	Título	Tipo	Compartimiento ambiental afectado	Impactos ambientales reportados	Especies contaminantes	Conclusiones del artículo
Pratiwi A., et. al. / 2018	Life-cycle climate-change impact assessment of enhanced geothermal system plants in the Upper Rhine Valley	EGS	Agua Aire	Cambio climático Contaminación del agua	Carbon y acero inoxidable; Combustibles fósiles; Cemento; Productos Químicos; CO <sub>2</sub> ;	<p>La planta Rittershoffen en funcionamiento emite entre 6.97 y 9.15 gCO<sub>2</sub>eq/kWh a lo largo de sus 25 años de vida útil. Se calcula que la próxima planta, Illkirch-Graffenstaden, emitirá de 2.69–4.39 gCO<sub>2</sub>eq/kWh.</p> <p>El estudio muestra que, para todos los escenarios, cuanto mas sea la vida útil de la planta, menos gCO<sub>2</sub>eq se emiten por kWh.</p> <p>En el desarrollo de los pozos es cuando se tienen mayores emisiones de GEI. Sin embargo, cuando se requiere tubería de transporte, las emisiones de su construcción podrían exceder las del desarrollo del pozo si la longitud es significativa. En términos de recursos, los productos metálicos son los que más contribuyen a las emisiones de GEI.</p>

# Referencias bibliográficas

- ▶ IEA (2022), World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022?language=es>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- ▶ Sistema de Información Energética, SENER <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE5C01>
- ▶ -Secretaría de Medio Ambiente, SEMA (2013). Impacto ambiental. Recuperado en 2019 de: <https://www.sema.gob.mx/SGA-IMPACTO-CONCEPTOS.htm>
- ▶ Importancia de los hidrocarburos, Paz María de Lourdes Cornejo Arteaga, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n2/m11.html>
- ▶ Hidrocarburos convencionales y no convencionales, Cabanillas L., et. al., sept. 2013 [https://www.researchgate.net/publication/282859103\\_Hidrocarburos\\_convencionales\\_y\\_no\\_convencionales](https://www.researchgate.net/publication/282859103_Hidrocarburos_convencionales_y_no_convencionales)
- ▶ Energía geotérmica, Secretaría de energía Argentina [http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_geotermica.pdf](http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf)
- ▶ Desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía, II UNAM <http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p14/p14-antecedentes/9-linea-de-investigacion/proyecto/28-p11>
- ▶ Lake, L. (1989). Enhanced Oil Recovery. Ed. Prentice Hall. 2ª ed., EUA. 16. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/347633777/Enhanced-Oil-Recovery-Larry-W-Lake-pdf>
- ▶ **Sistemas geotérmicos mejorados: revisión y análisis de casos de estudio** [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-02832020000100101](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832020000100101)
- ▶ Potenciales impactos ambientales del fracking en México, Muñoz, E. 2017

