

Gasificación subterránea del carbón (UCG)

Noviembre de 2015



Noviembre de 2015

Dra. Mariann Lloyd-Smith

Índice

Resumen.....	4
1.0 ¿Qué es la gasificación subterránea del carbón?	5
1.1 El proceso de UCG.....	5
1.2 Desmantelamiento de operaciones de UCG	8
2.0 Usos del syngas.....	9
3.0 El tratamiento del syngas	10
4.0 La historia de la UCG	10
5.0 Impactos ambientales	11
5.1 Contaminantes producidos por la gasificación subterránea	12
5.2 Contaminación del agua subterránea.....	12
5.3 Contaminación del aire	14
5.4 Impactos en el clima.....	15
5.5 Residuos sólidos y aguas residuales.....	15
5.6 Subsistencia	17
6.0 La experiencia australiana.....	17
6.1 Comercialización interrumpida	18
7.0 Litigio contra Linc Energy	19
7.1 Zona de exclusión de excavación	22
8.0 Conclusión	22
Productos químicos y contaminantes de la UCG.....	24

Gasificación subterránea del carbón (UCG)

Octubre de 2015

El presente informe es un documento abierto que se irá actualizando a medida que se publique información importante.

Título original: ***Underground Coal Gasification November 2015 - National Toxics Network***

Versión digital disponible en: <http://www.ntn.org.au/wp/wp-content/uploads/2015/11/Nov-Underground-Coal-Gasification-Nov-2015f.pdf>

Traducción a cargo de **Nancy Viviana Piñeiro** y **Laura Beratti**.

Algunos pasajes especialmente técnicos se han parafraseado en la versión en español para facilitar su comprensión. Con el mismo fin también se incorporaron dos ilustraciones en las que se detalla la fuente.

La traducción de este informe se enmarca en el proyecto *Energías Extremas en América Latina* del **Observatorio Petrolero Sur** y cuenta con financiamiento de la **Fundación Heinrich Böll – Oficina Cono Sur**. Para información sobre proyectos de gasificación subterránea de carbón/UCG en Argentina se puede consultar la página del **OPSur** www.opsur.org.ar o escribir a contacto@opsur.org.ar.

Resumen

Syngas: la energía del infierno

En 1913, Vladímir Lenin describió la gasificación subterránea del carbón (UCG, por su sigla en inglés) como la "gran victoria de la tecnología" que liberaría a los obreros de los peligros del trabajo en las minas. Hoy, en el sudeste de Queensland, Australia, la llaman "Syngas: la energía del infierno". La gasificación subterránea del carbón es un proceso industrial que genera grandes cantidades de contaminantes del aire y también del agua. No es solo por ello que el medio ambiente está en peligro, sino también por la industrialización de tierras agrícolas estratégicas. La experiencia australiana ha demostrado que la industria no puede controlar completamente las emisiones tóxicas y que la UCG conlleva riesgos importantes para la salud humana, la agricultura y el medio ambiente.

1.0 ¿Qué es la gasificación subterránea del carbón?



La gasificación subterránea del carbón (UCG) es un proceso industrial que convierte el carbón en syngas o gas de síntesis¹ Este gas obtenido por UCG es una mezcla de dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), nitrógeno, vapor e hidrocarburos gaseosos, producidos mediante la combustión parcial de carbón subterráneo en presencia de agua, con un suministro de oxígeno controlado. La proporción de gases varía según el tipo de carbón y la eficacia y el control del proceso de gasificación.

1.1 El proceso de UCG

A diferencia de la gasificación en reactores industriales, que producen syngas², la UCG es un proceso de gasificación subterránea *in situ* realizado a distancia, en general, en vetas de carbón no explotadas.³ La gasificación se suele realizar a una temperatura que oscila entre 900 y 1200 grados Celsius, pero puede llegar hasta 1500 °C.

Al comienzo de la operación de UCG, los pozos de inyección introducen agentes de ignición, como propano o nitrato de amonio-fueloil, aire, vapor u oxígeno, para iniciar la combustión. Una vez generada la combustión en la veta de carbón, los pozos de inyección suministran aire, vapor o dióxido de carbono con el fin de mantener y controlar la tasa de combustión.

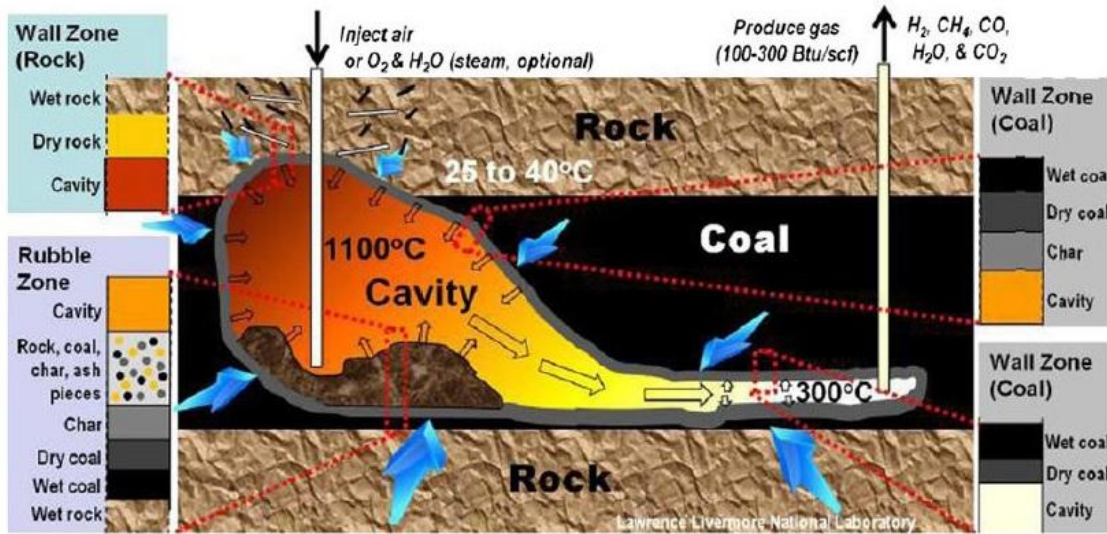
La combustión convierte el carbono alojado en el carbón en CO₂ y calor. Este calor desencadena reacciones secundarias entre el CO₂ y el agua, que producen CO, hidrógeno diatómico gaseoso (H₂) y CH₄. Luego estos gases se extraen mediante un pozo de producción, y quedan en la cavidad de la cámara el alquitrán, el residuo sólido

¹ NdeE: El syngas también recibe la denominación de “gas de gasógeno” o “gas pobre”.

² Independent Scientific Panel (ISP) Report On Underground Coal Gasification Pilot Trials, junio de 2013, Panel Científico Independiente de Queensland sobre la gasificación subterránea del carbón. Profesor Chris Moran, Director, Instituto de Minerales Sustentables, Universidad de Queensland. Profesor Joe da Costa, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Queensland. Profesor Emérito Cris Cuff, C&R Consulting, Townsville, Queensland.

³ Existen pruebas de que China está utilizando el proceso en minas de carbón parcialmente explotadas.

del carbón y cenizas de fondo.



Fuente: Lawrence Livermore National Laboratory

Referencias: **Rock:** Roca. **Coal:** Carbón. **Wall Zone (Rock):** Zona de pared (roca). **Wet rock:** Roca húmeda. **Dry rock:** Roca seca. **Cavity:** Cavity. **Rubble Zone:** Zona de escombros. **Cavity:** cavity. **Rock, coal, char, ash pieces:** trozos de roca, carbón, alquitrán, cenizas. **Char:** Alquitrán. **Dry coal:** Carbón seco. **Wet Coal:** Carbón húmedo. **Wet rock:** Roca húmeda. **Inject air or O₂ & H₂O (steam, optional):** Inyección de aire o O₂ & H₂O (vapor, opcional). **Produce gas:** Gas producido.

Entre la zona de combustión y los pozos de producción, el gas circula a través de la veta de carbón. Para facilitar el flujo, se crea una "conexión" desde la zona de combustión hasta el o los pozos de producción utilizando el método de fractura hidráulica, perforación direccional, combustión inversa⁴ o fractura con explosivos.^{5 6}

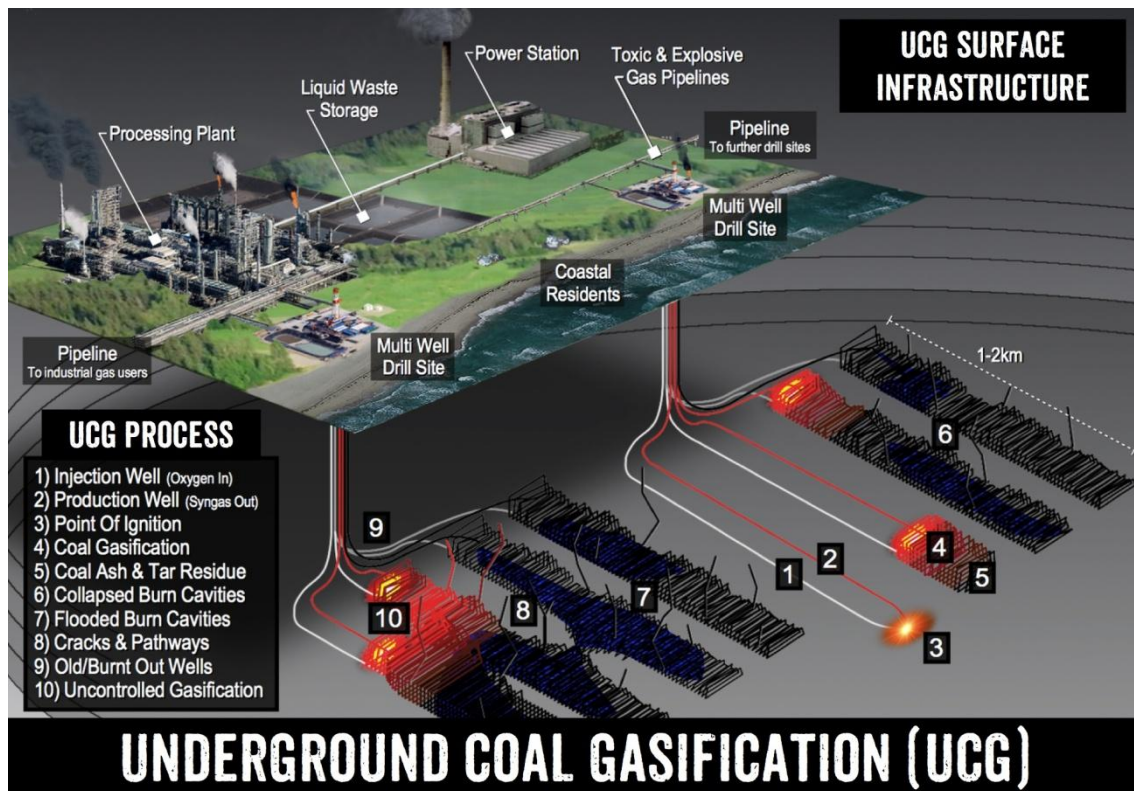
Existen dos métodos diferentes de UCG. En uno se utilizan pozos verticales y combustión inversa para abrir vías internas en el carbón. En el otro método, se crean pozos individuales dentro de la veta de carbón mediante tecnología de perforación adaptada que se emplea en la producción de gas y petróleo. En este caso se utiliza un punto de inyección móvil conocido como CRIP (punto de control de inyección de retracción).

⁴ La combustión inversa se logra mediante la ignición cerca del pozo de producción y la propagación de la llama a contracorriente hacia el pozo de inyección.

⁵ Evgeny Shafirovich y Arvind Varma, "Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status", en Ind. Eng. Chem. Res., N° 48, 2009, pp. 7865–7875.

⁶ USEPA, The Class V Underground Injection Control Study, vol. 13: "In-Situ Fossil Fuel Recovery Wells". http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/class5/upload/2007_12_12_uic_class5_study_uic-class5_classvstudy_volume13-in-situfossilfuelrecovery.pdf [Consulta 2016-09-13].

Infraestructura de superficie de la gasificación subterránea de carbón



Fuente: Frack Off. 20 impacts of underground coal gasification (UCG)

Referencias: **Processing Plant:** Planta de procesamiento. **Liquid Waste Storage:** Almacenamiento de desechos líquidos. **Power Station:** Central eléctrica. **Toxic & Explosive Gas Pipelines:** Tuberías con gas tóxico y explosivo. **Pipeline To further drill sites:** Gasoducto hacia otras locaciones de perforación. **Pipeline To industrial gas users:** Gasoducto a usuarios industriales de gas. **Multi-well Drill Site:** Locación multipozo. **Coastal Residents:** Residentes en zona costera. 1) **Injection Well (oxygen in):** Pozo inyector (ingresa oxígeno). 2) **Production Well (syngas out):** Pozo productor (sale syngas). 3) **Point of Ignition:** Punto de ignición. 4) **Coal Gasification:** Gasificación del carbón. 5) **Coal Ash & Tar Residue:** Residuos de ceniza de carbón y alquitrán. 6) **Collapsed Burn Cavities:** Cavidades de combustión colapsadas. 7) **Flooded Burn Cavities:** Cavidades de combustión inundadas. 8) **Cracks & Pathways:** Grietas y vías. 9) **Old/Burnt Out Wells:** Pozos viejos/agotados. 10) **Uncontrolled Gasification:** Gasificación no controlada.

Los pozos de la UCG, en general, tienen menos de 200 metros de profundidad, aunque se han hecho experimentos con pozos de 800 metros aproximadamente (por ejemplo, en Thunder Basin, Wyoming). Los pozos se deben construir de modo que soporten la exposición a las tensiones térmicas y mecánicas extremas asociadas con presiones altas, temperaturas extremadamente altas y la posible subsidencia⁷ del techo de la cavidad. El espesor de la veta de carbón es esencial, ya que un menor grosor puede reducir el valor calórico del gas de síntesis –si es inferior a 2 metros puede sufrir una

⁷ NdeE: Subsidencia: Proceso de hundimiento vertical de una cuenca sedimentaria como consecuencia del peso de los sedimentos que se van depositando en ella de una manera progresiva.

disminución considerable.⁸

El mecanismo principal para prevenir la migración de contaminantes durante las operaciones de UCG consiste en mantener las presiones del gas que se halla dentro del gasificador; estas deben ser menores a la presión hidrostática equivalente del agua subterránea que se encuentra dentro de la veta de carbón y en los estratos adyacentes. Si se mantiene el gradiente de presión neto hacia la cámara del gasificador, se reduce la probabilidad de que el gas y los contaminantes asociados escapen del sitio de la combustión, a menos que éste presente fallas y fisuras.

Las operaciones de UCG tienen un cierto grado de imprecisión y no se prestan a un control adecuado. Existe una importante cantidad de variables, como la tasa de influjo de agua, la distribución de los reactivos en la zona de gasificación y la tasa de crecimiento de la cavidad de la cámara. Estas variables solo pueden calcularse midiendo la temperatura y analizando la calidad y cantidad de gas de síntesis.⁹

1.2 Desmantelamiento de operaciones de UCG

Un componente esencial de la técnica es el desmantelamiento y la remediación de la cavidad de la cámara. La secuencia de cierre final para un panel¹⁰ de UCG se considera compleja, de mediano a largo plazo.¹¹ El objetivo es extinguir la reacción limitando el suministro de oxígeno y llevar los materiales que rodean la cavidad a un equilibrio térmico con la veta de carbón adyacente y los estratos que se encuentran por encima y por debajo de la cavidad.¹² En ocasiones, esto no se logra fácilmente. Por ejemplo, en Jharia, India, hace unos 100 años que arde una mina de carbón bajo la superficie, ya que no se puede cortar por completo el suministro de oxígeno.

Cuando se enfría la cavidad, aumenta la probabilidad de que se formen químicos tóxicos. "Existe una alta probabilidad de formación de sustancias químicas, fenómeno inherente al proceso, que pueden ser contaminantes, como benceno, tolueno, xileno (compuestos BTEX), fenoles, varios hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y otros hidrocarburos. Esto es resultado de la pirólisis continua del carbón a

⁸ Shafirovich et al., 2009.

⁹ USEPA, 2007.

¹⁰ NdeE: Sección de la veta intervenida con la técnica.

¹¹ ISP, 2013.

¹² *Ibíd.*

temperaturas que oscilan entre los 250 °C y los 700 °C, y favorecen su formación, de modo que, cuando se enfría la cavidad, inevitablemente se producirán estos elementos químicos indeseados."¹³

Durante el desmantelamiento también debe limpiarse la cavidad. Se utiliza una presión menor para llevar el agua subterránea y arrastrar los elementos químicos residuales de la zona activa a la cavidad. El calor residual en la cavidad se emplea para vaporizar el agua y los contaminantes, que luego se llevan a la superficie para su tratamiento. Cuando termina la combustión, el agua presente en los acuíferos comienza a filtrarse hacia la cavidad, que aún contiene cenizas, alquitrán y escombros. Ésta se terminará llenando con una combinación de los residuos del carbón gasificado, los estratos de sobrecarga colapsados y los estratos subyacentes perturbados, más el agua subterránea.¹⁴ Sin embargo, el Panel Científico Independiente (ISP, por su sigla en inglés) de Queensland observó que, si la cavidad posgasificación está llena aunque sea parcialmente con escombros, la integridad del sello podría verse comprometida.

2.0 Usos del syngas



La UCG produce gases que luego se queman para generar calor o electricidad, o se licúan y refinan para producir combustible. La conversión de gas a líquido (GTL, por su sigla en inglés) es un proceso de conversión química mediante el cual el syngas se transforma en crudo sintético, que luego se refina empleando métodos tradicionales para producir diésel y *jet fuel* (combustible pesado) más limpios. El syngas se puede utilizar para fabricar productos químicos, entre otros, amoníaco, fertilizantes y explosivos, y para producir hidrógeno. Se ha observado que transportar el gas a largas distancias disminuye su eficiencia económica; por lo tanto, se recomienda utilizarlo para la generación de energía o para su conversión en otros productos cerca del sitio de UCG.¹⁵

¹³ Ibíd.

¹⁴ Ibíd.

¹⁵ Shafirovich et al., 2009.

3.0 El tratamiento del syngas



Dependiendo del uso previsto, el gas deberá someterse a tratamiento. Por ejemplo, eliminar compuestos que contienen azufre, como sulfuro de hidrógeno (H_2S), se considera esencial para la aplicación final del gas, y se realiza mediante una serie de productos químicos industriales.¹⁶ Para eliminar partículas y alquitrán, se utilizan otras tecnologías, desde tratamientos físicos, como separadores ciclónicos, filtros de barrera, precipitadores electrostáticos y limpieza húmeda del gas o depuradores húmedos, hasta procesos térmicos, como craqueo térmico, limpieza en seco del gas y métodos con plasma. Para la limpieza húmeda del syngas se emplean agentes depuradores líquidos en un sistema de depuración.¹⁷

4.0 La historia de la UCG



La Unión Soviética inició un programa de investigación y desarrollo en la década de 1930, que generó la instalación de varias plantas de UCG a escala industrial. Hacia la década de 1960, operaban cinco plantas, pero en la actualidad el único sitio comercial existente se ubica en Angren, Uzbekistán.¹⁸ En Estados Unidos, se realizaron pruebas de UCG en Alabama en las décadas de 1940 y 1950, y varias más entre 1972 y 1989 en distintas localidades, como Wyoming, Texas, Washington y Virginia. Muchas de estas operaciones, por ejemplo, Hoe Creek y Rock Springs, en Wyoming, y Río Blanco, en Colorado, causaron contaminación grave del agua subterránea.¹⁹

¹⁶ Véase por ejemplo http://www.dow.com/gastreating/solution/pa_scor.htm [Consulta 2016-09-13].

¹⁷ L.C. Laurence y D. Ashenafi, "Syngas Treatment Unit for Small Scale Gasification - Application to IC Engine Gas Quality Requirement", en Journal of Applied Fluid Mechanics, vol. 5, n.º 1, 2012, pp. 95-103.

¹⁸ Shafirovich et al., 2009.

¹⁹ USEPA, 2007.

En los ochenta se realizaron experimentos en Francia y Bélgica, pero no tuvieron un resultado satisfactorio, a pesar de que se usaron nuevas técnicas de fractura hidráulica y combustión inversa. En los noventa se inició un proyecto de UCG en España, pero finalizó cuando, debido a un mal funcionamiento, se produjo una acumulación de metano que desencadenó una explosión.²⁰ En el Reino Unido se completó un estudio de prefactibilidad a principios del año 2000 y se comenzó a trabajar en la selección de un sitio de prueba.

Aunque son pocos los detalles que se conocen de las actividades de UCG en China, se sabe que este país llevó a cabo 16 proyectos piloto desde 1991. Además, según informes periodísticos, en 2014, SinoCoking Coal and Coke Chemical Industries firmó un acuerdo con el Instituto de Ingeniería de procesos de la Academia de Ciencias de China y el Instituto de Ciencia y Tecnología del Norte de China para perfeccionar e implementar una tecnología que convierta 21 millones de toneladas de carbón de cuatro minas subterráneas de SinoCoking en syngas.²¹

5.0 Impactos ambientales



Se ha asociado la gasificación subterránea a una cantidad de impactos ambientales, como la contaminación del agua subterránea, contaminación del aire, subsidencia e incremento del cambio climático. Quienes la defienden sostienen que, en comparación con la extracción y el procesamiento tradicionales del carbón, la UCG elimina el daño en la superficie y la descarga de residuos sólidos, y reduce las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y óxido de nitrógeno (NO_x). Sin embargo, el flujo de residuos gaseosos, líquidos y sólidos que acompaña a la técnica es una fuente reconocida de contaminantes con efecto mutagénico y cancerígeno que puede contaminar el agua subterránea.²²

²⁰ Shafirovich et al., 2009.

²¹ <http://www.coalage.com/news/latest/3871-chinese-launch-new-underground-coal-gasification-project.html#.VgyoVUtUPKM> [Consulta 2016-09-13].

²² Fergusson, L., A "Study of Underground Coal Gasification (UCG) Wastewater and Sludge", en Int. J. Environ. Res., vol. 9, n.º 3, 2015, pp. 777-784.

5.1 Contaminantes producidos por la gasificación subterránea

La combustión del carbón da origen a una serie de subproductos y residuos de la combustión, como cenizas e hidrocarburos que permanecen dentro de la cámara. Estos incluyen sustancias muy tóxicas, como mercurio, fenol, benceno, dioxinas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH). La ceniza de la combustión también suele contener metales, como arsénico, cadmio, cromo, cobalto, plomo y selenio. La solubilidad de los metales pesados en agua aumenta con la combustión, dado que ya no están fuertemente ligados entre sí.

En las vetas de carbón hay materiales radiactivos de origen natural (NORM, por su sigla en inglés), como torio, uranio y sus derivados degradados, radio 228 y radio 226.²³ La Asociación Nuclear Mundial observa que las cantidades de radionucleidos son significativas. El carbón de los EE. UU., Australia, la India y el Reino Unido contiene hasta 4 ppm de uranio, mientras que el de Alemania puede tener hasta 13 ppm y el de Brasil y China, hasta 20 ppm de uranio. Las concentraciones de torio suelen ser tres veces superiores a las de uranio. Durante la combustión, los radionucleidos se concentran en la ceniza y allí permanecen. La concentración de uranio y torio en la ceniza puede ser hasta diez veces mayor que la concentración en el carbón quemado, mientras que otros radionucleidos, como plomo 210 (^{210}Pb) y potasio 40 (^{40}K), pueden concentrarse en un grado incluso mayor en las cenizas volantes.²⁴ Es poco lo que se conoce sobre la liberación de sustancias radioactivas en las actividades de UCG.

5.2 Contaminación del agua subterránea

Las fracturas y grietas naturales de las vetas de carbón y rocas adyacentes dan paso a la migración de agua y gas desde y hacia la cavidad de la cámara. Cuando la cavidad está llena, el agua puede salir y llevar consigo contaminantes que se

²³ Hoja informativa FS-163-97 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de octubre de 1997, "Radioactive Elements in Coal and Fly Ash: Abundance, Forms, and Environmental Significance", <http://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/FS-163-97.html> [Consulta 2016-09-13].

²⁴ <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx> [Consulta 2016-09-13].

dispersarán en el suelo y agua subterránea adyacentes.²⁵ Estas condiciones, junto con la hidrosolubilidad de los contaminantes, dan lugar a una movilidad relativamente elevada de los contaminantes.

A pesar de lo que afirma la industria, no es seguro que sea posible aislar una operación de UCG del agua subterránea adyacente, ya que el calor y la subsidencia que produce esta actividad pueden crear fracturas que cambian el flujo del agua subterránea.²⁶ Se considera esencial supervisar la UCG para detectar compuestos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BETX), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y compuestos fenólicos, y contaminantes inorgánicos.²⁷

Se ha identificado una gran cantidad de contaminantes hídricos en distintas operaciones de gasificación subterránea realizadas hasta el momento y, en algunos sitios, se detectó la contaminación a largo plazo del agua subterránea. Los contaminantes orgánicos detectados después del proceso de UCG incluyen fenoles, benceno con sus derivados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), heterociclos, amoníaco, mercurio, zinc, sulfatos, cianuros y otros metales pesados.²⁸ La concentración de fenol en el agua subterránea fue alta debido a su gran hidrosolubilidad.²⁹

Las operaciones de gasificación subterránea en los EE. UU., en Hoe Creek y Rock Springs (Wyoming) y Río Blanco (Colorado), han causado contaminación del agua subterránea. Los principales contaminantes fueron fenoles y benceno. Algunos, como el amoníaco, el nitrato y el benceno, superaban, en uno o más sitios de UCG, los valores máximos establecidos según las normas primarias para aguas subterráneas.³⁰

Después de las quemas en la prueba piloto a escala de UCG en Hoe Creek, las muestras de agua subterránea que se tomaron indicaron que el colapso del techo de la cavidad de la cámara causado por la gasificación había interconectado tres

²⁵ Verma, R.P. et al., "Review, Contamination of groundwater due to underground coal gasification", en *Water Resources and Environmental Engineering*, vol. 6, n.º 12, 2014, pp. 303-311.

²⁶ USEPA, The Class V Underground Injection Control Study [Estudio sobre control de inyección subterránea de pozos clase V], vol. 13: "In-Situ Fossil Fuel Recovery Wells", en http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/class5/upload/2007_12_12_uic_class5_study_uic-class5_classvstudy_volume13-in-situfossilfuelrecovery.pdf [Consulta 2016-09-13].

²⁷ Shafirovich et al., 2009.

²⁸ Verma et al., 2014.

²⁹ Verma et al., 2014.

³⁰ USEPA, 2007.

acuíferos. Las muestras de más de doce pozos en las inmediaciones del sitio demostraron una concentración mucho mayor de compuestos orgánicos e inorgánicos liberados de las cenizas residuales. Ingresaron al agua subterránea productos de la combustión, como fenoles y benceno. El Departamento de Energía de los Estados Unidos concluyó que la contaminación del agua subterránea en el sitio acarrea un riesgo futuro para los seres humanos y el ganado que ingiera agua de pozos cercanos, así como un riesgo para los hábitats de los humedales situados gradiente abajo del sitio.³¹

5.3 Contaminación del aire

El proceso de UCG libera gases tóxicos durante la fase de construcción, la fase operativa y el desmantelamiento. Se han identificado posibles fuentes de emisiones asociadas con estas instalaciones, tales como:

- emisiones relacionadas con la construcción y el transporte;
- gas generado mediante los procesos de gasificación de carbón;
- venteo durante la puesta en marcha con el fin de secar el gasificador para la operación normal;
- quema proveniente de la planta piloto de UCG y de las válvulas de seguridad durante condiciones regulares o anormales, y
- gases de escape de motor de gas.

La evaluación de un asesor³² sobre la planta propuesta en Sudáfrica concluyó que: "De acuerdo con los datos disponibles, la construcción y la operación de la planta de UCG propuesta tendrá un efecto negativo en la calidad del aire ambiente local". Se observó que el venteo durante condiciones "anormales" generaría emisiones de monóxido de carbono (CO) y que, con la quema durante condiciones "anormales" y las emisiones continuas de gases de escape, se generarían emisiones de CO, NO₂ y SO₂ que afectarían la calidad del aire ambiente.

Durante la puesta en marcha, se quema el gas bruto; las emisiones asociadas

³¹ *Ibíd.*

³² Air Quality Specialist Assessment for Underground Coal Gasification and Gas-Fired Power Generation, Informe del proyecto de African Carbon Energy (Pty) Limited, 2014, número de informe: 13615077-12437-6, Etienne Roux, Golder Associates Africa (Pty) Ltd.

incluyen partículas (hollín), hidrocarburos sin quemar, CO, NO_x, PAH, productos de combustión incompleta y, en algunos casos, H₂S o SO₂. Las cantidades de emisiones de hidrocarburos generadas se relacionan con el grado de combustión, mientras que la tasa de quema es determinada por la capacidad y la tasa de producción de las instalaciones.

Al evaluar los impactos de la UCG en la calidad del aire, es esencial tener en cuenta el conjunto de emisiones fugitivas, que ocurrirán inevitablemente. En Australia, el Gobierno de Queensland afirmó que la contaminación gaseosa de la planta de Linc Energy ha afectado una gran superficie de tierra.

5.4 Impactos en el clima

El Consejo Mundial de la Energía calcula que la UCG podría aumentar la extracción económica de 600 000 millones de toneladas de reservas de carbón, lo que permitiría a las empresas acceder a depósitos que se solían considerar "no explotables".

"Por unidad de energía, la quema de carbón libera más CO₂, que contribuye al calentamiento global, que cualquier otro combustible, y la UCG no es la excepción."³³

Dado que en la UCG parte de la energía se pierde por disipación de calor a la roca, se debe quemar más carbón y, por lo tanto, se genera más CO₂ para producir la misma cantidad de energía. Si sumamos las emisiones de transporte y extracción, resulta difícil considerar que la UCG es inocua para el clima.

5.5 Residuos sólidos y aguas residuales

La UCG produce grandes volúmenes de residuos sólidos y agua residual contaminada, incluidos los efluentes líquidos generados a partir de la depuración del gas. Además de los gases que se elevan hacia la superficie en el pozo de producción, también se detecta una cantidad considerable de aguas residuales y residuos sólidos. El efluente está compuesto por el agua de formación extraída, partículas y gases disueltos, hidrocarburos y numerosas sales. Entre el 3 y el 5 % del agua residual está compuesta

³³ <http://groundtruthtrekking.org/Issues/AlaskaCoal/UndergroundCoalGasification.html#ixzz3ImC5k0uR>
[Consulta 2016-09-13].

por sólidos, que se convierten en fango una vez que se sedimentan en la planta de tratamiento.³⁴ Estos flujos de residuos deben separarse y tratarse después de la extracción.

Los hallazgos de un estudio de 2015³⁵ que buscaba identificar los principales elementos químicos orgánicos e inorgánicos y las propiedades odoríferas del agua residual y el fango de la UCG en un sitio en Australia confirmaron que:

- el agua residual tiene un olor altamente desagradable y presenta concentraciones considerablemente altas de benceno, hidrocarburos alcanos y fenoles, y
- el lodo tiene un olor igualmente desagradable y presenta concentraciones incluso más altas de compuestos BTEX, hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y fenoles.

En los residuos de la UCG se detectaron fenoles en concentraciones extremadamente altas, entre 5550 ppm y 21 000 ppm. En el estudio se observó que éstos, que son mutagénicos y posiblemente cancerígenos, también pueden causar dolor de cabeza, irritación en la nariz, la garganta y los pulmones, y daños en el hígado, los riñones y el sistema nervioso central.³⁶

En la notificación inicial que Linc Energy envió al Gobierno sobre su proyecto conjunto de UCG y conversión de carbón a líquido, se observó que "la operación de la quema piloto causó mayores niveles de fenol, benceno y PAH en el condensado".³⁷

En general, la gestión de estos residuos ha incluido algún tratamiento para los efluentes líquidos y la posterior reutilización, por ejemplo, para riego. Se realizaba el venteo de los efluentes gaseosos durante el tratamiento posterior y se enviaban los residuos sólidos del tratamiento del agua a un vertedero. Las cenizas o la escoria permanecían en el punto de gasificación en las cavidades subterráneas.³⁸

³⁴ Fergusson, L., A "Study of Underground Coal Gasification (UCG) Wastewater and Sludge", en Int. J. Environ. Res., vol. 9, N° 3, 2015, pp. 777-784.

³⁵ Fergusson, 2015.

³⁶ *Ibíd.*

³⁷ <http://www.statedevelopment.qld.gov.au/resources/project/linc-energy/linc-energy-ias.pdf> [Consulta 2016-09-13].

³⁸ Declaración inicial de información sobre el proyecto de UCG/CTL y generación de energía de Linc Energy en Chinchilla, diciembre de 2006 <http://www.statedevelopment.qld.gov.au/resources/project/linc->

5.6 Subsistencia

Es posible que la subsidencia sea inevitable con la UCG, debido a que se quema la capa portante de carbón y quedan solo cenizas residuales y un vacío. Muchos proyectos de UCG proponen gasificar vetas de carbón que se encuentran a una profundidad tal que son inaccesibles para la minería convencional y, por lo tanto, el hundimiento en la superficie sería mínimo. Sin embargo, aunque éste sea invisible en la superficie, puede afectar el flujo de agua subterránea.

6.0 La experiencia australiana



En Australia se realizaron tres proyectos piloto de UCG. En el sudeste de Queensland, el sitio de prueba Carbon Energy funcionaba al oeste de Dalby y el de Linc Energy se ubicada cerca de los pueblos rurales de Chinchilla y Hopeland. Mientras que el de Cougar Energy se llevó a cabo en Kingaroy, en el norte de Queensland

Cougar Energy comenzó las actividades en marzo de 2010, y se le ordenó cancelar sus actividades en julio de 2010 debido a la contaminación con benceno y tolueno en pozos cercanos.³⁹ Se presentaron cargos por la ruptura de un pozo de producción que causó la liberación de contaminantes de UCG, benceno y tolueno, al agua subterránea. La empresa se declaró culpable de tres violaciones de la Ley de Protección Ambiental de 1994 y se vio obligada a pagar 75 000 dólares australianos (53 250 dólares estadounidenses) por haber filtrado benceno en el agua.⁴⁰

Carbon Energy comenzó en 2008 e inició su fase de desmantelamiento en 2012. Se presentaron cargos contra la empresa por presunta violación de las condiciones de su autorización ambiental y por no haber notificado al Departamento de Medio Ambiente y Gestión de Recursos, en 2009, el derrame de agua de producción en un arroyo

[energy/linc-energy-ias.pdf](#) [Consulta 2016-09-13].

³⁹ <https://www.australianmining.com.au/news/cougar-fined-over-leak-of-carcinogenic-chemical-at-kingaroy/> [Consulta 2016-09-13].

⁴⁰ <http://statements.qld.gov.au/Statement/2013/9/24/cougar-energy-fined-75000-for-breaching-environmental-protection-act.> [Consulta 2016-09-13].

cercano, Bloodwood, tal como se requería.

También se acusó a la empresa por desechar agua de producción irrigándola en la tierra sin aprobación. Carbon Energy se declaró culpable de los tres cargos y debió pagar una multa de 60 000 dólares australianos [u\$s42 600].⁴¹ El jefe ejecutivo de la empresa también se declaró culpable de no garantizar que Carbon Energy cumpliera con la *Ley de Protección Ambiental de 1994* y debió pagar una multa de 2000 dólares australianos [u\$s1 400].⁴²

Después de realizar una inspección del sitio en junio de 2010, el Departamento de Medio Ambiente y Gestión de Recursos emitió una orden de protección del medio ambiente que impedía el reinicio de las actividades de UCG en la planta de prueba. Desde entonces, el Departamento levantó la orden y otorgó a la empresa nuevas autorizaciones ambientales en febrero de 2011. En 2012, el Panel Científico Independiente descubrió que el diseño de la planta de Carbon Energy contemplaba múltiples sitios de combustión pero aún no había proporcionado un plan de supervisión del conjunto.

La instalación de demostración de Linc Energy funcionó desde el año 1999, y el desmantelamiento comenzó en 2013. Linc ensayó 5 operaciones de gasificación diferentes y una planta de conversión de gas a líquido (GTL, por su sigla en inglés) *in situ*. En un período de prueba de 30 meses, gasificó aproximadamente 35 000 toneladas de carbón a una profundidad de 120 metros, y quemó y liberó la mayor parte del gas a la atmósfera. En 2007, Linc inició la construcción de su planta piloto de GTL y en octubre de 2008 produjo el primer crudo sintético.

En 2013, el Panel Científico Independiente (ISP, por su sigla en inglés)⁴³ establecido por el Gobierno del estado de Queensland cuestionó a Linc Energy por la selección del sitio de Chinchilla, dado que la geología local no era adecuada.

6.1 Comercialización interrumpida

⁴¹ <http://statements.qld.gov.au/Statement/2012/12/6/carbon-energy-fined-for-releasing-contaminated-water> [Consulta 2016-09-13].

⁴² *Ibíd.*

⁴³ ISP, 2013.

En julio de 2014, el Gobierno de Queensland, siguiendo las recomendaciones del ISP,⁴⁴ denegó la autorización de comercialización hasta que la industria demostrara que los proyectos de UCG se pueden dismantelar de manera segura, es decir, que es posible apagar el fuego, remediar la cámara y prevenir la contaminación del agua subterránea. El Panel Científico Independiente solicitó pruebas de que el proceso de combustión del carbón subterráneo se podía concluir de manera segura y que no acarrearía ningún problema. El ISP determinó que ni Carbon Energy ni Linc Energy proporcionaron suficiente información sobre la operación y el dismantelamiento de las cavidades previas o las secciones de la veta (*panels*) que se encontraban activas en ese momento para concluir que fueran seguros.

El ISP emitió la siguiente recomendación: "Recomendación específica n.º 4. No deben encenderse más secciones de la veta hasta que no se demuestre inequívocamente la seguridad medioambiental a largo plazo garantizada por un dismantelamiento eficaz. Las pruebas de la eficacia del dismantelamiento deben ser exhaustivas".

7.0 Litigio contra Linc Energy



En abril de 2014, el Departamento de Medio Ambiente de Queensland presentó cuatro cargos contra Linc Energy por la presunta contaminación ambiental causada por sus instalaciones de UCG. En 2015, el Gobierno presentó un quinto cargo por causar daños ambientales graves deliberada e ilícitamente. Afirmaron que los daños se habían producido dentro y fuera del sitio.

Una investigación⁴⁵ encargada por el Departamento de Medio Ambiente de Queensland concluyó que la planta de UCG de Linc Energy había causado daños irreversibles en la atmósfera, la vegetación, el agua y el suelo. Se informó⁴⁶ que se detectaron concentraciones de hidrógeno en el suelo en niveles explosivos y que se hallaron cantidades anormales de metano en un área extensa. La región afectada es

⁴⁴ *Ibíd.*

⁴⁵ Report on landform damage and alleged environmental harm from the Linc Energy Pilot trial, Chinchilla, Queensland, de Gilbert & Sutherland, junio de 2015. Véase <http://www.abc.net.au/news/2015-08-10/linc-energy-key-findings/6681938> [Consulta 2016-09-13]. Se debe tener en cuenta que este informe será confidencial hasta que se termine de preparar la causa judicial contra Linc Energy.

⁴⁶ www.abc.net.au/news/2015-08-10/linc-energy-secret-report-reveals-toxic-chemical-risk/6681740 [Consulta 2016-09-13].

un área fértil de la región Western Darling Downs, destinada al cultivo de trigo, cebada y algodón y al pastoreo de ganado, y en ella también se encuentran algunos productores orgánicos.

En la investigación de la empresa consultora Gilbert & Sutherland y la Universidad de Queensland se analizaron muestras de aire, agua y suelo. Se informó la presencia de compuestos orgánicos volátiles cancerígenos y otros gases en un área extensa adyacente a las instalaciones de Linc.

"Hemos hallado gases en cantidades que superaban el límite de explosividad. En el reconocimiento de los pozos efectuado, se detectaron niveles explosivos que indican concentraciones mucho más altas en la atmósfera del suelo."

Los trabajadores informaron casos de burbujas de gas en charcos que se formaban en el suelo, y de una sustancia negra, similar al alquitrán, que se presentaba junto con las burbujas. Los operadores también informaron haber detectado gas en la atmósfera en repetidas ocasiones con sus detectores personales.⁴⁷

El canal público australiano ABC informó las conclusiones de la investigación, que sigue siendo confidencial:

El grado de contaminación es extendido, de gran impacto y, en parte, irreversible. [...] se extiende en un área con alto valor de conservación, al norte del sitio de Linc [...] y, aunque aún no se ha confirmado el alcance total de la extensión y concentración de los gases del indicador, abarca una superficie muy amplia (> 20 a 310 km²).

En el informe de los asesores, se observa que la contaminación fue causada por la liberación de syngas, derivados y gases que lo componen, y por el agua subterránea contaminada, el alquitrán y otros olores y productos derivados del petróleo, en forma de fenoles y otros productos. Es muy posible que esta haya ocurrido cuando se rompieron los estratos de sobrecarga de la cámara (la "capa de protección"), presuntamente ya en 2007. Señalaron la probabilidad de que la combinación de contaminantes en mezclas de gases y líquidos tenga un mayor nivel de transporte en

⁴⁷ <http://www.abc.net.au/news/2015-03-17/linc-energy-accuse-failing-report-series-of-dangerous-leaks/6323850> [Consulta 2016-09-13].

el medio ambiente, y cause más contaminación. Dado que los contaminantes se dispersaron a los estratos que se hallan por encima de la cavidad y al perfil del suelo, existía el riesgo de que dichos contaminantes se liberaran durante el uso habitual de la tierra y en las actividades agrícolas. Con el tiempo, esto podría exponer a los agricultores y propietarios de los campos a los contaminantes y posiblemente afectar el suelo, la salud ecológica y el uso de la tierra.

Cabe destacar que se confirmó que los contaminantes identificados y medidos dentro y fuera del sitio eran productos o subproductos de las actividades de UCG y que presentaban "la misma huella de gas". La investigación concluyó lo siguiente: "No se encontró en las cercanías ninguna otra actividad, fuente de hidrógeno ni ningún otro contaminante que tuviera una vinculación verosímil con los resultados o diera cuenta de ellos".

Otros documentos, que entregó a ABC el magistrado a cargo de la causa penal, consignan la existencia de investigadores del departamento hospitalizados por sospecha de intoxicación por gas durante las pruebas del suelo en el sitio, en marzo de 2015. Se informó que posteriormente se detectaron altos niveles de benceno.

En los documentos presentados a la Corte Suprema en Brisbane [capital del estado de Queensland]⁴⁸ también figuran una serie de presuntos incidentes no informados en la planta, incluido un incendio que motivó la evacuación del sitio en 2007 y causó fugas persistentes de gas tóxico en el aire y el agua subterránea entre 2008 y 2011. El Gobierno de Queensland ha informado a los residentes que tendrían a su disposición más detalles de las pruebas y muestras ese mismo año (2015).

En los documentos judiciales también se afirmó que la salud de los trabajadores de la planta se había visto afectada. El personal había presentado quejas por hemorragias nasales, mareos, náuseas y vómitos, dolores de cabeza, visión borrosa y problemas respiratorios después de exponerse a los olores de las piletas de desechos. En los documentos se deja constancia de que el personal había informado a la empresa sobre los incidentes y las fugas de gas ocasionadas, pero nunca se informó a las autoridades gubernamentales correspondientes. Los empleados habían tenido que firmar acuerdos de confidencialidad, que les impedían divulgar información sobre las

⁴⁸<http://www.abc.net.au/news/2015-08-10/linc-energy-secret-report-reveals-toxic-chemical-risk/6681740> [Consulta 2016-09-13].

instalaciones de Linc.

7.1 Zona de exclusión de excavación

El Gobierno de Queensland ha impuesto una "zona de exclusión de excavación" en una superficie de 314 kilómetros cuadrados alrededor de las instalaciones de Linc, donde los propietarios de los campos tienen prohibido cavar pozos de más de dos metros. Instalaron 52 pozos de supervisión del suelo a largo plazo.

Linc Energy anunció que dejaría de operar en el sitio en agosto de 2013,⁴⁹ después de 14 años de pruebas de funcionamiento; sin embargo, la quema continúa en el sitio de Linc debido a la presencia de metano. El Gobierno de Queensland ha solicitado 22 millones de dólares australianos [u\$s15 620000] en concepto de garantía financiera adicional para cubrir el costo de la limpieza del agua y los sedimentos en varias piletas en las instalaciones, que según el departamento "probablemente" contengan dioxinas y otros contaminantes. Linc se rehúsa a proporcionar la garantía y ha presentado un recurso ante el Tribunal de Tierras.

A pesar de los cargos y los presuntos daños ambientales, en septiembre de 2015, el sitio web de Linc Energy continuaba afirmando que ofrecían "una alternativa de energía más limpia, más económica y más segura" a través de su tecnología "de gasificación subterránea del carbón (UCG) probada y líder en todo el mundo".

8.0 Conclusión



No se ha podido demostrar que la UCG sea una forma segura ni eficaz de producir energía. Una y otra vez, las pruebas piloto provocaron contaminación del aire y del agua, y la experiencia australiana ha demostrado que la industria no puede controlar sus emisiones tóxicas. Tal como sucede con los combustibles fósiles, la UCG exagera aún más el cambio climático. La experiencia de Australia demuestra que esta tecnología acarrea riesgos

⁴⁹ <http://www.theaustralian.com.au/business/mining-energy/linc-energy-calls-it-quits-on-ucg-project/story-e6frg9df-1226753791059> [Consulta 2016-09-13].

considerables para la salud humana, la agricultura y el medio ambiente en general. El costo que ha generado no solo es para la salud de los trabajadores y el futuro de las comunidades locales y los agricultores, sino también para las arcas públicas, ya que la investigación actual supuso para el Gobierno de Queensland un gasto de 6,5 millones de dólares australianos [u\$s4 615000]. Los posibles daños para la salud humana, la agricultura y el medio ambiente en general vinculados al desarrollo de la UCG son tan graves que no se justifica asumir esos riesgos.

Anexo 1

Productos químicos y contaminantes de la UCG

Compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos)

Los BTEX son compuestos orgánicos volátiles de origen natural que se encuentran en los depósitos de carbón y el agua subterránea asociada.⁵⁰ La perforación y otros procesos de UCG liberan compuestos BTEX de la veta de carbón. Algunos de sus efectos sobre la salud son irritación de la piel, los ojos y la nariz, mareos, dolor de cabeza, pérdida de coordinación y problemas en el aparato respiratorio. La exposición crónica puede causar daños en los riñones, el hígado y el sistema circulatorio.



Toxic

El **benceno** puede causar leucemia, linfoma no Hodgkin y problemas en el sistema inmunológico, además de mutaciones y aberraciones cromosómicas en células humanas y animales.⁵¹ También se lo ha vinculado con anomalías congénitas⁵² y del esperma.⁵³ Según la Organización Mundial de la Salud la exposición al benceno constituye una preocupación importante para la salud pública. Observa que el benceno es una causa establecida de cáncer en seres humanos; además, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer clasificó el benceno como cancerígeno para los seres humanos (grupo 1).

Fenoles

El Departamento de Salud de Nueva Jersey considera que los fenoles son mutagénicos⁵⁴ y, aunque pertenecen al grupo D,⁵⁴ no clasificables como cancerígenos para los seres humanos, por falta de datos, observan que, por ser mutágenos conllevan riesgo de cáncer. Se ha informado en estudios cutáneos que el fenol aplicado a la piel puede promover el desarrollo de tumores y tener una capacidad cancerígena débil para la piel en ratones. El fenol causa dolor de cabeza, irritación en

⁵⁰ <http://www.ehp.qld.gov.au/management/coal-seam-gas/pdf/btex-report.pdf> [Consulta 2016-09-13].

⁵¹ <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp3-c6.pdf> [Consulta 2016-09-13].

⁵² <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20923742> [Consulta 2016-09-13].

⁵³ <http://www.environmentalhealthnews.org/ehs/news/benzene-linked-to-sperm-abnormalities>

[Consulta 2016-09-13].

⁵⁴ <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1487.pdf> [Consulta 2016-09-13].

la nariz, la garganta y los pulmones, y daños en el hígado, los riñones y el sistema nervioso central. Es muy irritante para la piel, los ojos y las mucosas en los seres humanos tras exposiciones agudas por inhalación o por la piel. Se han informado casos de anorexia, pérdida de peso progresiva, diarrea y efectos en la sangre y el hígado en seres humanos con exposición crónica.⁵⁵ En estudios en animales se ha demostrado retraso del crecimiento y desarrollo anormal de las crías de animales expuestos al fenol por vía oral. Los fenoles son extremadamente hidrosolubles y pueden formar clorofenoles si el agua contiene cloro. La presencia de fenol en recursos hídricos puede afectar la calidad del agua y los organismos acuáticos.⁵⁶

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)

Los PAH son un grupo de compuestos volátiles muy tóxicos. Se generan por quema de productos como carbón, petróleo, gas y basura cuando el proceso de quemado no se completa. Los PAH son persistentes y pueden permanecer en el medio ambiente durante mucho tiempo. Los distintos PAH tienen comportamientos diferentes. Algunos pueden convertirse en vapor en el aire con gran facilidad. La mayoría no se descompone fácilmente en el agua.⁵⁷ Los PAH han causado tumores en animales de laboratorio expuestos a PAH a través de alimentos, aire contaminado o contacto con la piel. Algunos metabolitos de PAH interactúan con el ADN y son genotóxicos: causan neoplasias y trastornos genéticos hereditarios en seres humanos. Una exposición elevada a mezclas de PAH en el lugar de trabajo conlleva un riesgo considerable de cáncer de pulmón, piel o vejiga.⁵⁸ Las investigaciones⁵⁹ indican que las personas que viven o trabajan cerca de pozos de gas natural activos pueden estar expuestas a contaminantes en niveles más altos de lo que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos considera seguro en la exposición por vida.

Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (VOC, por su sigla en inglés) son compuestos orgánicos que se transforman fácilmente en vapores o gases. Se liberan con la quema de combustibles como carbón o gas natural, se emiten en campos de petróleo y gas y

⁵⁵ <http://www3.epa.gov/airtoxics/hlthef/phenol.html> [Consulta 2016-09-13].

⁵⁶ Edris Bazrafshan, Ferdos Kord Mostafapour y Hossein Jafari Mansourian, "Phenolic Compounds: Health Effects and Its Removal From Aqueous Environments by Low Cost Adsorbents", en Health Scope, vol. 2, N° 2, 2013. pp. 65-66.

⁵⁷ <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/wastemin/web/pdf/pahs.pdf> [Consulta 2016-09-13].

⁵⁸ <http://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=13> [Consulta 2016-09-13].

⁵⁹ Paulik et al., "Impact of natural gas extraction on PAH levels in ambient air", en Environ Sci Technol, vol. 49, N° 8, 2015, pp. 5203-10. DOI: 10.1021/es506095e. ePub: 9 de abril de 2015.

escape de diésel, y se liberan durante la perforación, la quema, la fractura hidráulica o en los estanques de agua residual y equipos y maquinarias. Muchos compuestos VOC son peligrosos contaminantes del aire y, cuando se combinan con óxidos de nitrógeno, reaccionan y forman ozono en superficie (esmog). La exposición a compuestos VOC puede causar irritación en los ojos, la nariz y la garganta, dolor de cabeza, trastornos visuales, deterioro de la memoria, pérdida de coordinación, náuseas y lesiones hepáticas, renales y del sistema nervioso central.⁶⁰ Algunos compuestos VOC causan cáncer en animales (por ejemplo, cloruro de metileno) y en seres humanos (por ejemplo, formaldehído), o se sospecha que son cancerígenos para los seres humanos (por ejemplo, cloroformo o bromodiclorometano). Algunos compuestos VOC, como el formaldehído y el estireno, son sustancias químicas que perturban la función endocrina (EDC, por su sigla en inglés).⁶¹

Óxidos de nitrógeno

Dos de los óxidos de nitrógeno más comunes son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. Algunas fuentes de emisión de óxidos de nitrógeno son maquinarias, compresores y quemadores. Los óxidos de nitrógeno pueden reaccionar con VOC y formar ozono en superficie, que se halla vinculado a crisis asmáticas y otros efectos graves para la salud. El dióxido de nitrógeno puede causar problemas respiratorios, enfermedades cardíacas y lesiones en los pulmones. Puede interferir en la capacidad de la sangre de transportar oxígeno por el cuerpo, lo que causa dolores de cabeza, fatiga, mareos y un color azulado en la piel y los labios. La exposición prolongada a óxidos de nitrógeno en el esmog puede causar problemas respiratorios graves, como lesiones en el tejido de los pulmones y reducción de la función pulmonar. La exposición a niveles bajos de óxidos de nitrógeno en el esmog puede irritar los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones. Puede causar tos, falta de aliento (disnea), fatiga y náuseas. La exposición industrial al dióxido de nitrógeno puede causar mutaciones genéticas, daños en el feto y disminución de la fertilidad en las mujeres.⁶²

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido, que es muy tóxico. Lo

⁶⁰ <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>
[Consulta 2016-09-13].

⁶¹ Biblioteca Nacional de Medicina de los EE. UU.
http://toxtown.nlm.nih.gov/text_version/chemicals.php?id=65 [Consulta 2016-09-13].

⁶² http://toxtown.nlm.nih.gov/text_version/chemicals.php?id=19 [Consulta 2016-09-13].

produce la quema incompleta de gas natural, gas licuado de petróleo, combustible, petróleo, kerosén, carbón mineral, carbón vegetal o madera. Los artefactos que funcionan con estos combustibles también pueden producir CO. También se libera durante la quema de gas. La exposición a niveles bajos de monóxido de carbono puede causar fatiga, dolor torácico, falta de aliento (disnea), pérdida de memoria, lesiones cutáneas, sudoración y síntomas seudogripales. La exposición prolongada a niveles bajos puede causar cardiopatía y daños en el sistema nervioso. La exposición a niveles altos puede provocar deterioro de la visión y la coordinación, pérdida de conocimiento, dolor de cabeza, mareos, confusión, vómitos, debilidad muscular y náuseas. La exposición a concentraciones muy elevadas de CO puede causar convulsiones, coma y muerte. El CO puede causar abortos espontáneos o aumentar el riesgo de daños en el feto y también ser causante de bajo peso al nacer y daños en el sistema nervioso. Los más susceptibles a los efectos del CO son los niños pequeños, las mujeres embarazadas, las personas mayores, las personas con anemia, neumopatía o cardiopatía, personas en altitudes elevadas y fumadores.⁶³

Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro de olor penetrante. La mayor parte del SO₂ que está en el aire proviene de la quema de carbón y petróleo en las centrales eléctricas. El SO₂ reacciona con otros elementos químicos, como óxidos de nitrógeno, y forma lluvia ácida, que puede dañar los pulmones y causar enfermedades respiratorias, enfermedades cardíacas y muerte prematura. Inhalar dióxido de azufre puede irritar la nariz, la garganta y los pulmones y causar tos y falta de aliento (disnea). La exposición prolongada a niveles persistentes de dióxido de azufre puede ocasionar bronquitis crónica, enfisema y enfermedades respiratorias. También puede agravar una cardiopatía existente. La exposición industrial prolongada a dióxido de azufre puede disminuir la fertilidad en hombres y mujeres. Los adultos y los niños con asma son sensibles a la exposición a dióxido de azufre.⁶⁴

Sulfuro de hidrógeno (H₂S)

El sulfuro de hidrógeno se encuentra de forma natural en algunas formaciones de gas y carbón y se puede liberar cuando se ventea o quema el gas o a través de emisiones fugitivas. Es un gas tóxico, que es letal si se inhala en concentraciones elevadas de más de 500 ppm. Irrita los pulmones y las vías respiratorias y tiene un efecto narcótico

⁶³ http://toxtown.nlm.nih.gov/text_version/chemicals.php?id=7 [Consulta 2016-09-13].

⁶⁴ http://toxtown.nlm.nih.gov/text_version/chemicals.php?id=29 [Consulta 2016-09-13].

en el sistema nervioso central. La reacción del H₂S con los líquidos de la nariz y los pulmones forma ácido sulfúrico.⁶⁵ El H₂S es un irritante y un asfixiante químico con efectos en la utilización del oxígeno y en el sistema nervioso central. Los efectos sobre la salud pueden variar según el nivel de la exposición y su duración. Concentraciones bajas irritan los ojos, la nariz, la garganta y el sistema respiratorio (por ejemplo, ardor en los ojos o lagrimeo, tos, falta de aliento [disnea]), y los asmáticos pueden tener dificultad para respirar. Los efectos pueden tardar varias horas o, a veces, varios días en aparecer cuando se trabaja en concentraciones bajas. La exposición repetida o prolongada puede causar inflamación de ojos, dolor de cabeza, fatiga, irritabilidad, insomnio, trastornos digestivos y pérdida de peso. La exposición repetida puede causar efectos en la salud que se producen a niveles que antes se toleraron sin ningún efecto. Las concentraciones moderadas pueden causar irritación intensa en los ojos y el sistema respiratorio (como tos, dificultad para respirar o acumulación de líquido en los pulmones), dolor de cabeza, mareos, náuseas, vómitos, tambaleo y excitabilidad.⁶⁶

Mercurio

El mercurio es un elemento de origen natural presente en varias formas: elemental (o metálica) y orgánica e inorgánica (por ejemplo, metilmercurio). Estas formas de mercurio difieren en su grado de toxicidad y en los efectos que causan en los sistemas nervioso, digestivo e inmunológico y en los pulmones, riñones, piel y ojos. Incluso la exposición a cantidades pequeñas de mercurio puede causar graves problemas de salud y pone en riesgo el desarrollo del feto en el útero y del niño en los primeros años de vida. El mercurio se encuentra de forma natural en la corteza terrestre y se libera al medio ambiente a partir de la actividad volcánica y la meteorización de las rocas, y como resultado de actividades humanas, en particular, centrales de carbón y quema de carbón residencial para calefaccionar y cocinar. Una vez que está en el medio ambiente, las bacterias pueden transformar el mercurio en metilmercurio, que luego se bioacumula en peces y mariscos. La OMS considera que el mercurio es uno de los diez elementos químicos o grupos de elementos químicos que representan una preocupación importante para la salud pública.⁶⁷

⁶⁵ ADS Gillies, HW Wu, MS Kizil y T Harvey, "The Mining Challenge Of Handling Coal Seam Hydrogen Sulphide", en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.527.5422&rep=rep1&type=pdf> [Consulta 2016-09-13].

⁶⁶ https://www.osha.gov/OshDoc/data_Hurricane_Facts/hydrogen_sulfide_fact.pdf [Consulta 2016-09-13].

⁶⁷ <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/en/> [Consulta 2016-09-13].

Dioxinas

Las dioxinas son un grupo de compuestos relacionados químicamente que son contaminantes medioambientales persistentes. La más tóxica de la familia de dioxinas es la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD). Las dioxinas están presentes en el medio ambiente en todo el mundo, y en organismos vivos, incluidos los seres humanos, donde las absorbe el tejido adiposo. En el medio ambiente, las dioxinas tienden a acumularse en la cadena alimentaria, sobre todo en el tejido adiposo de los animales. Cuanto mayor sea el nivel que ocupa un animal en la cadena alimentaria, mayor será la concentración de dioxinas. Las dioxinas son muy tóxicas y pueden causar problemas reproductivos y del desarrollo, daños en el sistema inmunológico, interferencias con las hormonas y también cáncer. El feto es más sensible a la exposición a dioxinas. En los seres humanos, una exposición breve a altos niveles de dioxinas puede causar lesiones cutáneas, como cloracné y manchas oscuras irregulares en la piel, y alteraciones en la función hepática. La exposición prolongada está vinculada con inmunodeficiencia e insuficiencia del sistema nervioso en desarrollo, el sistema endocrino y las funciones reproductivas. La exposición crónica a dioxinas causó varios tipos de cáncer en animales. La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por su sigla en inglés) de la OMS evaluó la TCDD en 1997 y 2012. Según los datos de animales y datos epidemiológicos humanos, la IARC clasificó a la TCDD como "cancerígeno para los seres humanos".⁶⁸

⁶⁸ <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs225/en/> [Consulta 2016-09-13].