

Todos los contenidos de EHP son accesibles para las personas con discapacidad. Se puede encontrar una versión en HTML totalmente accesible en <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.122-A50>.



RADIONUCLEÓTIDOS
en las **AGUAS RESIDUALES**
de la **FRACTURACIÓN HIDRÁULICA**
Manejo de una mezcla tóxica

Un embalse revestido recibe residuos en una zona de fracturación en Dimock, Pensilvania.

© J. Henry Fair

Existen radionucleótidos distribuidos naturalmente en la corteza terrestre, por lo que no es de extrañar que en los procesos de extracción de minerales e hidrocarburos, tanto convencionales como no convencionales, se produzcan a menudo residuos radioactivos.¹ Los residuos radioactivos de las perforaciones son una forma de TENORM (la abreviatura que en inglés se utiliza para nombrar al material radioactivo tecnológicamente procesado que se da naturalmente). Se trata de material radioactivo que existe de forma natural (NORM, en inglés) y que se ha concentrado o que ha quedado expuesto al ser humano a través de medios antropogénicos.² Tanto la rapidez de crecimiento como la magnitud del auge de las perforaciones para obtener gas natural en Estados Unidos han aumentado el interés en el estudio de los problemas de la exposición radioactiva y del manejo de residuos.

Quizás en ningún otro lugar la cuestión de los residuos se destaque tanto como en Pensilvania, donde la extracción de gases de la formación de esquisto Marcellus mediante la fracturación hidráulica hizo de este estado el productor con el crecimiento más rápido en Estados Unidos entre 2011 y 2012.³ “Se sabe que la formación Marcellus tiene un elevado contenido de uranio”, dice Mark Engle, geólogo investigador del Servicio Geológico de Estados Unidos. Añade que las concentraciones de radio-226 –un producto de la descomposición del uranio– pueden exceder los 10 000 picocuries por litro (pCi/L) en la salmuera concentrada atrapada en las profundidades del esquisto.

Hasta la fecha, la industria y las agencias reguladoras de la perforación han considerado que el riesgo que los desechos radiactivos representan para los trabajadores y para el público es menor. En Pensilvania, Lisa Kasianowitz, especialista en información del Departamento de Protección ambiental (en inglés, PADEP), señala que en la actualidad no hay nada que “indique que el público o los trabajadores tengan riesgo alguno para su salud debido a la exposición a las radiaciones de estos materiales”. Sin embargo, dados los grandes huecos existentes en los datos, esto resulta poco confortante para muchos miembros de la comunidad de la salud pública.

Producción y almacenamiento de desechos

Después de la fracturación hidráulica, gases y líquidos, entre ellos, el agua inyectada y cualquier otro tipo de agua que se encuentre en la formación (a lo que se conoce como “agua de fracturación” y “agua producida”⁴) son extraídos a la superficie. Los líquidos atrapados en el esquisto son restos de agua salada antigua, cuyas sales alcanzaron concentraciones extremas a lo largo de millones de años. Las interacciones químicas de estas sales con las rocas que las rodean pueden movilizar radionucleótidos.^{5,6} Varios estudios indican que, en términos generales, cuanto más salada es el agua, mayor es su radioactividad.^{5,7}

Los compuestos disueltos suelen precipitarse y salir así del agua, lo que provoca su acumulación como un sarro rico en nucleótidos dentro de las tuberías. Los operadores pueden inyectar sustancias químicas con el fin de disolver el sarro que obstruye las tuberías.⁸ También es posible eliminar el sarro mediante barrenas, explosivos o chorros de líquido,⁹ en cuyo caso se une a la corriente de desechos sólidos.

Con frecuencia los desechos son almacenados temporalmente en contenedores o en embalses superficiales, también llamados pozos o estanques. Los datos sobre el número de estanques utilizados en la extracción de gas de esquisto son escasos, pero según Kasianowitz, hay 25 embalses centralizados en Pensilvania. Los embalses centralizados pueden ser del tamaño de una cancha de fútbol y pueden tener una capacidad de, al menos, 10 millones de galones de líquido. Si bien es probable que, en un momento dado, el número de estanques más pequeños sea mucho mayor, ella afirma que estas lagunas efímeras se utilizan sobre todo en la primera fase del desarrollo de los pozos y se las deja de utilizar muy pronto.

La mayoría de los embalses se forran con una capa de plástico. Las regulaciones de Pensilvania exigen que los revestimientos para los em-

balses temporales y para la eliminación de desechos tengan un grosor mínimo de 30 mm y que las juntas se sellen para prevenir fugas.¹⁰ El único requisito en Ohio es que los pozos sean impermeables.¹⁰ Sin embargo, los revestimientos inadecuados pueden desgarrarse;⁷ incluso ha habido reportes de revestimientos de pozos desgarrados y de derramamientos de pozos en Pensilvania y otros estados.¹¹

Un pequeño estudio de los pozos de reserva, realizado en 2013 en la región de depósitos de esquisto de Barnett en Texas, sugiere otra consideración que se debe tomar en cuenta al evaluar la seguridad de los pozos. Los investigadores midieron el radio –el radionucleótido generalmente utilizado como intermediario para juzgar si un desecho NORM cumple con las directrices reguladoras para su eliminación–, así como otros siete radionucleótidos para los cuales no se realizan pruebas rutinarias. Si bien los radionucleótidos individuales se hallaban en las directrices regulatorias existentes, la radiación beta total en una muestra equivalió a más de ocho veces el límite normativo. “Si se evalúa únicamente el radionucleótido radio como indican las directrices normativas sobre la exposición, en lugar de tomar en cuenta todos los radionucleótidos, se puede subestimar de hecho el potencial de la

exposición a las radiaciones para los trabajadores, para el público general y para el medio ambiente”, escribieron los autores.²

Aguas superficiales

En última instancia, la mayoría de las aguas residuales se tratan y se reutilizan, o bien se envían a pozos de inyección de la clase II (pozos de desecho o pozos de recuperación mejorada). Una pequeña fracción de las aguas residuales de la fracturación hidráulica en Pensilvania se sigue tratando y liberando a las aguas superficiales hasta que se concedan los permisos para operar plantas de tratamiento bajo nuevas normas más estrictas, señala Kasianowitz.

Recientemente, las preocupaciones sobre los materiales NORM en el depósito Marcellus se han enfocado en las aguas superficiales de Pensilvania. Esto se debe a que, hasta el año 2011, la mayoría del agua producida se enviaba a las plantas de tratamiento de aguas residuales comerciales o públicas antes de descargarla a los ríos y arroyos, muchos de los cuales también sirven como reservas de agua potable. Según Kasianowitz, en abril de ese año, el PADEP pidió a todas las operaciones de fracturación hidráulica del depósito de esquisto Marcellus que dejaran de enviar sus aguas residuales a las plantas de



La extracción de gas del depósito de esquisto Marcellus mediante fracturación hidráulica hizo de Pensilvania el productor con crecimiento más rápido en Estados Unidos entre 2011 y 2012. Se sabe que el depósito Marcellus tiene un alto contenido de uranio; las concentraciones de radio-226 –un producto de la descomposición del metal– pueden exceder los 10 000 pCi/L en la salmuera concentrada atrapada en las profundidades del esquisto.

tratamiento. Si bien esta petición era voluntaria, motivó a la mayoría de los productores a comenzar a reutilizar directamente una fracción considerable de su agua producida, o bien, a reutilizarla después de tratarla en plantas de tratamiento comerciales dedicadas, las cuales están equipadas para manejar sus contaminantes.

Un equipo de investigadores de la Universidad Duke, dirigidos por el geoquímico Avner Vengosh, buscó caracterizar el efluente que estaba siendo descargado de una de esas plantas, la Planta de Tratamiento de Salmuera de Josephine, en el suroeste de Pensilvania. Los investigadores compararon la radioactividad y disolvieron los sólidos en el sedimento río arriba y río abajo de la planta, y encontraron 90% de reducción de la radiactividad en el efluente. No es que los componentes radioactivos simplemente hubieran desaparecido; los autores observaron que lo más probable era que hubieran sido transferidos y acumulados hasta alcanzar niveles más altos en el lodo que iría a dar al relleno sanitario.¹²

Los sedimentos fluviales en la zona de descarga también presentaron niveles altos de radiactividad, mantenidos fuera de las aguas superficiales, río abajo, pero que planteaban el riesgo de bioacumulación en la red local de alimentos. Los niveles de radiación del sedimento de salida en la zona de descarga eran 200 veces mayores que los de los sedimentos río arriba. El estudio resaltó “el potencial de acumulación de radio en los sedimentos de arroyos y estanques en muchas otras zonas en las que se liberan accidentalmente al medio ambiente aguas residuales de la fracturación hidráulica”, dice Vengosh.

El estudio también demostró otro impacto potencial de la salmuera tratada sobre la calidad del agua. La mayoría del agua producida contiene bromuro, que puede combinarse con materia orgánica que existe naturalmente y con el

desinfectante de cloro para formar contaminantes del agua potable, a los que se conoce como trihalometanos. Estos compuestos están asociados con problemas hepáticos, renales y del sistema nervioso.¹³ Los investigadores de la Universidad Duke reportaron concentraciones muy elevadas de bromuro a una milla río abajo de la planta –una carga futura potencial para las plantas de tratamiento de agua potable río abajo–.¹²

Inyección profunda

Tras el cambio de política de 2011, los pozos de inyección de la clase II en Ohio comenzaron a recibir muchas de las aguas residuales de la etapa final desde Pensilvania. La geología de ese estado no se presta a este método; el estado sólo cuenta con seis pozos de inyección para este propósito, mientras que Ohio tiene 177,¹⁰ y en Texas hay 50 000.¹⁴

Los pozos de inyección de la clase II colocan las aguas residuales por debajo de los estratos de roca que contienen mantos freáticos utilizables. Según la sabiduría industrial convencional, esto previene la migración de contaminantes a zonas de agua dulce menos profundas.^{7,15,16,17}

No obstante, algunos consideran que ésta puede ser una suposición deficiente. El motivo por el que la fracturación hidráulica funciona para forzar al gas a salir de la roca también es la causa por la que algunos observadores piensan que los pozos de inyección podrían ser inestables: la extrema presión de la inyección puede tardar casi un año en disiparse, según el hidrólogo asesor Tom Myers, quien publicó un estudio de modelado del comportamiento subterráneo de las aguas residuales de la fracturación hidráulica en 2012.¹⁸

Según Myers, una presión sostenida más alta que la normal puede hacer que las aguas de formación y las sustancias químicas empleadas en la fracturación hidráulica suban más

cerca de la superficie, más rápido que en una escala de tiempo geológica natural de miles de años. Esto ocurre sobre todo cuando hay fallas o pozos abandonados dentro de la zona de fracturación.

Otro estudio ha demostrado la posibilidad de que el agua de formación emigre a los acuíferos de agua dulce a través de vías naturales.¹⁹ Si bien esas vías no fueron generadas por perforaciones para obtener gas, los autores del estudio sugieren que esas características podrían volver a ciertas áreas más vulnerables a la contaminación como resultado de la fracturación hidráulica.

Cuando se le preguntó a Vengosh acerca de la integridad de los pozos de inyección profunda, respondió: “Hasta donde sé, realmente no hay nadie que la esté verificando”. Si está habiendo esas fugas, añade, mucho de ello depende de cómo estén conectadas a los acuíferos de agua potable. “A diferencia de los sistemas de agua dulce en los que el radio se acumula en los sedimentos”, dice, “si se tiene una condición de alta salinidad y condiciones de reducción, el radio se disolverá en el agua y se moverá junto con ésta”.

Usos benéficos y rellenos sanitarios

También es posible dar a los desechos de la fracturación hidráulica “usos benéficos”, los cuales incluyen el empleo del agua producida como descongelante para los caminos o como supresor de polvo, utilizando detritos de perforación en el mantenimiento de las carreteras y esparciendo los líquidos o lodos en los campos.^{12,20,21} Pensilvania permite el uso de la salmuera de la fracturación hidráulica para controlar el polvo y el hielo en las carreteras mediante un permiso estatal.²² Si bien el permiso establece límites permisibles para numerosos componentes, entre éstos no se incluye la radiactividad.²³

La sabiduría convencional sobre la estabilidad del radio en los rellenos sanitarios se basa en un supuesto sobre su interacción con la barita (sulfato de bario), un componente común en los desechos de las perforaciones. Sin embargo, Charles Swann, del Instituto de Recursos Minerales de Mississippi, y sus colegas encontraron evidencias de que el radio en los desechos extendidos sobre los campos puede tener un comportamiento distinto del esperado en el suelo. Cuando mezclaron sarro con radio y barita con muestras del suelo típico de Mississippi en el laboratorio, el radio se solubilizó gradualmente separándose de la barita, probablemente como resultado de la actividad microbiana del suelo. “Este resultado”, escribieron los autores, “sugiere que sería necesario revisar los medios de desecho del sarro esparciéndolo sobre la tierra”.²⁴

Los sólidos y lodos también pueden ir a dar a los rellenos sanitarios. Los límites de radioactividad para los rellenos sanitarios municipales son establecidos por los estados y oscilan entre 5 y 50 pCi/g.²⁵ Desde que Pensilvania comenzó a exigir, en 2001, que se colocaran monitores de radiación en los rellenos sanitarios municipales, dice Kasianowitz, los lodos y sólidos de la fracturación hidráulica rara vez han causado problemas. En 2012 fueron la causa de que se disparara apenas 0.5% de todas las alarmas de los monitores. “No contenían niveles de radiactividad agudamente nocivos para el público”, según una reseña de las prácticas de fracturación hidráulica en Pensilvania, elaborada para la Revisión de las Regulaciones Estatales sobre Petróleo y Gas Natural, sin fines de lucro.²⁶ David Allard, director de la Oficina de Protección contra la Radiación, señala que, debido a que todos los suelos contienen, por lo menos, algunos radionucleótidos, “siempre habrá algo de radio, torio y

uranio porque esos rellenos sanitarios se encuentran en los suelos”.

Evaluación de las exposiciones

A nivel federal, los desechos radiactivos de petróleo y gas están exentos de casi todos los procesos reguladores a los que el público general podría esperar que estuvieran sujetos. Ni la Ley de Energía Atómica de 1954 ni la Ley de políticas sobre desechos con bajo nivel de radiactividad cubren los materiales NORM.² La Comisión Reguladora de la Energía Nuclear no tiene ninguna autoridad sobre los desechos radiactivos de petróleo y gas. Las leyes estatales son una especie de tela de retazos. Los trabajadores están cubiertos por algunas protecciones federales contra la radiación, aunque un boletín sobre seguridad emitido en 1989 por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacionales señaló que las fuentes NORM de exposición “pueden haber sido pasadas por alto por las agencias federales y estatales en el pasado”.²⁷

La fracturación hidráulica en el depósito Marcellus ha avanzado tan rápidamente, que la comprensión pública y la investigación de sus consecuencias radiactivas han quedado rezagadas. “Nos preocupa que la gente beba agua que [potencialmente podría contener] radio-226”, dice David Brown, toxicólogo de salud pública del Proyecto de Salud Ambiental del Suroeste de Pensilvania. “Cuando alguien nos llama para preguntarnos ‘¿es seguro beber nuestra agua?’, la respuesta es ‘no lo sé’”.

El PADEP está llevando a cabo un estudio para determinar el grado de exposición potencial a las aguas residuales radiactivas de la fracturación hidráulica.²⁸ El estudio del PADEP tomará muestras de detritos de perforación, aguas producidas, lodos, aguas residuales recicladas y lodos derivados del tratamiento, filtros de depuración, gas natural

extraído, acumulación de sarro en los revestimientos de los pozos y en las tuberías, y equipo de transporte de desechos. El PADEP también evaluará la radioactividad en las almohadillas de los pozos, las plantas de tratamiento de aguas residuales, las plantas de reciclaje de aguas residuales y los rellenos sanitarios.

La EPA está estudiando este problema con una revisión de los impactos potenciales de la fracturación hidráulica,²⁹ entre ellos, radiactividad, en los recursos de agua potable. A fines de 2014 se publicará un borrador del estudio de la EPA para someterlo a los comentarios del público y a una revisión por pares, según Christopher Impellitteri, jefe de la División del Manejo de la Calidad del Agua del Laboratorio Nacional de Investigación sobre el Manejo de Riesgos.

El estudio de la EPA incluye una investigación diseñada para evaluar los impactos potenciales de los derramamientos superficiales, inyección de pozos y descarga de aguas residuales tratadas, resultantes de la fracturación hidráulica en las fuentes de agua potable. Un proyecto modelará el transporte de los contaminantes, incluido el radio, de los desagües de los procesos de tratamiento y la reutilización de aguas residuales. Se están realizando pruebas a muestras de aguas subterráneas para detectar radio-226, radio-228 y radiaciones alfa y beta brutas. El estudio general no incluye el radón.²⁹

Tanto el radón como el radio emiten partículas alfa, que son sumamente peligrosas cuando se las inhala o ingiere. Cuando se inhala, el radón puede provocar cáncer de pulmón, y hay cierta evidencia de que puede provocar otros cánceres como la leucemia.³⁰ El consumo del radio en el agua potable puede ocasionar linfoma, cáncer de hueso y leucemias.³¹ El radio también emite rayos gamma, que incrementan el

“Si todo se hace como se supone que debe hacerse, el impacto de esta radioactividad en el medio ambiente será mínimo en Pensilvania [...] La única vía potencial es un accidente, un derramamiento o una fuga”, señala Radisav R. Vidic, profesor de ingeniería civil y ambiental de la Universidad de Pittsburgh. Pero, añade, “Eso es algo que ocurre en todas las industrias, de modo que no hay nada que se pueda hacer al respecto”.



riesgo de cáncer en todo el cuerpo, como resultado de exposiciones externas. El radio-226 y el radio-228 tienen “vidas medias” de 1 600 años y 5.75 años, respectivamente. Se sabe que el radio se bioacumula en los invertebrados, moluscos y peces de agua dulce¹² (en cuyos huesos puede reemplazar el calcio). Llegado el momento, el radio se descompone en radón; el radón 222 tiene una vida media de 3.8 días.

Desde el punto de vista geoquímico, el radón y el radio se comportan de manera diferente. El radón es un gas inerte, de modo que no reacciona con otros elementos y por lo general se separa del agua producida junto con el metano en el manantial. Si bien hay pocos datos empíricos disponibles, a la industria del gas natural no le ha inquietado que el radón llegue a sus consumidores en cantidades importantes, debido en parte a la corta vida media del radón y a que mucho de él se libera en el ambiente en el manantial.³²

Más allá de las suposiciones

Las suposiciones sobre el control de calidad subyacen en mucho del debate sobre si los riesgos de la fracturación hidráulica sobrepasan sus beneficios. “Si todo se hace como se supone que debe hacerse, el impacto de esta radioactividad en el medio

ambiente será mínimo en Pensilvania, porque están reutilizando el agua”, señala Radisav R. Vidic, profesor de ingeniería civil y ambiental de la Universidad de Pittsburgh. “La única vía potencial es un accidente, un derramamiento o una fuga”. Pero, añade, “Eso es algo que ocurre en todas las industrias, de modo que no hay nada que se pueda hacer al respecto”.

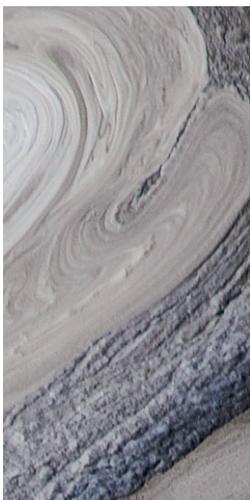
De hecho, afirma Vengosh, el PADEP tiene reportes de cientos de casos de derramamientos y contaminación en los que intervenían los líquidos provenientes de la fracturación hidráulica. Es más, añade, “La idea de que la industria pueda reutilizar toda el agua de fractura y el agua producida sencillamente no es posible, dada la química de las aguas residuales”.

Muchos de los estudios realizados hasta la fecha sobre los impactos de la fracturación hidráulica en el medio ambiente han padecido de una falta de acceso a las prácticas de tratamiento reales, según Engle. Él lo atribuye a una falta de confianza entre la industria y los científicos, y al hecho de que con frecuencia esa información es patentada. Sin embargo, Swann reporta una experiencia diferente en su trabajo con los productores de Mississippi. “Los pequeños productores independientes estaban muy dispuestos a cooperar y proporcionaron

gustosos asistencia, con frecuencia a expensas suyas”, dice. “Sólo gracias a su ayuda pudimos tomar muestras de tantos campos y pozos”.²⁴

La investigación publicada en diciembre de 2013 sugiere un nuevo tratamiento potencial para la radioactividad en los desechos de la fracturación hidráulica.³³ Vengosh y sus colegas combinaron diversas proporciones de aguas de fractura con el drenaje ácido de las minas (DAM) a fin de probar la posibilidad de utilizar este último como una fuente alternativa de agua para la fracturación hidráulica. El DAM –aguas sépticas ácidas de las zonas mineras y otras áreas alteradas– es un importante contaminante del agua en algunas regiones. Los experimentos de laboratorio mostraron que el mezclar el agua de fractura con DAM causó que mucho del material NORM del agua de fractura se precipitara y saliera, lo cual dejó al agua con niveles de radio cercanos a los que las normas de la EPA establecen para el agua potable.

Los autores sugieren que el precipitado radiactivo puede diluirse con desechos no radiactivos para alcanzar niveles apropiados para desecharlos en los rellenos sanitarios municipales. Si este método puede llevarse a una escala industrial, dice Vengosh, podría dar un uso benéfico al DAM y, al mismo tiempo, reducir la necesidad de utilizar agua dulce



La actual comprensión irregular y dispersa del destino de los desechos radiactivos de la fracturación hidráulica en el medio ambiente impide tomar buenas decisiones sobre su manejo. Y aun si la fracturación hidráulica del depósito Marcellus cesara de la noche a la mañana, los interrogantes y problemas potenciales sobre la radiactividad permanecerían. “Una vez que se libera líquido derivado de la fracturación hidráulica en el medio ambiente, se acaba por generar un legado radiactivo”, dice Avner Vengosh, investigador de la Universidad Duke.

en las operaciones de fracturación hidráulica y manejar los inevitables desechos radiactivos.

Los estudios como éste proporcionan una luz al final del pozo perforado. Sin embargo, la actual comprensión irregular y dispersa del destino de los desechos radiactivos de la fracturación hidráulica en el medio ambiente impide tomar buenas decisiones sobre su manejo. Y aun si la fracturación hidráulica del depósito Marcellus cesara de la noche a la mañana, los interrogantes y problemas potenciales sobre la radiactividad permanecerían. “Una vez que se libera líquido derivado de la fracturación hidráulica en el medio ambiente, se acaba por generar un legado radiactivo”, dice Vengosh.

Valerie J. Brown, periodista radicada en Oregon, que ha escrito para *EHP* desde 1996. En 2009 obtuvo un premio de la Sociedad de Periodistas Ambientales al Reportaje Explicativo Más Sobresaliente por sus escritos sobre epigenética.

Referencias

1. EPA. TENORM: Oil and Gas Production Wastes [página web]. Washington, DC: Oficina de Aire y Radiación, Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos U (actualizada el 30 de agosto de 2012). Disponible en: <http://www.epa.gov/radiation/tenorm/oilandgas.html> [consultada el 8 de enero de 2014].
2. Rich AL, Crosby EC. Analysis of reserve pit sludge from unconventional natural gas hydraulic fracturing and drilling operations for the presence of technologically enhanced naturally occurring radioactive material (TENORM). *New Solut* 23(1):117–135 (2013); <http://dx.doi.org/10.2190/NS.23.1.h>.
3. EIA. Pennsylvania is the fastest-growing natural gas-producing state [entrada de blog]. *Today in Energy* (17 de diciembre de 2013). Washington, DC: Administración de Información Energética de Estados Unidos, U.S. Departmento de Energía. Disponible en: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=14231#> [consultada el 8 de enero de 2014].
4. Schramm E. What Is Flowback and How Does It Differ from Produced Water? [página web]. Wilkes-Barre, PA: The Institute for Energy and Environmental Research for Northeastern Pennsylvania, Wilkes University (24 de marzo de 2011). Disponible en: <http://energy.wilkes.edu/pages/205.asp> [8 January 2014].
5. Rowan EL, et al. Radium Content of Oil- and Gas-Field Produced Waters in the Northern Appalachian Basin (USA)—Summary and Discussion of Data. *Scientific Investigations Report 2011–5135*. Washington, DC: U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior (2011). Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5135/pdf/sir2011-5135.pdf> [consultada el 8 de enero de 2014].
6. Haluszczak LO, et al. Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA. *Appl Geochem* 28:55–61 (2012); <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.002>
7. GAO. Oil and Gas: Information on Shale Resources, Development, and Environmental and Public Health Risks. GAO-12-732. Washington, DC: U.S. Government Accountability Office (5 de septiembre de 2012). Disponible en: <http://www.gao.gov/products/GAO-12-732> [consultada el 8 de enero de 2014].
8. IAEA. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry, Safety Reports Series No. 34. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (noviembre de 2003). Disponible en: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1171_web.pdf [consultada el 8 de enero de 2014].
9. Crabtree M, et al. Fighting scale: removal and prevention. *Oilfield Rev* 11(3):30–45 (1999); <http://goo.gl/AAyqx>.
10. GAO. Unconventional Oil and Gas Development: Key Environmental and Public Health Requirements. GAO-12-874. Washington, DC: U.S. Government Accountability Office (septiembre de 2012). Disponible en: <http://www.gao.gov/assets/650/647782.pdf> [consultada el 8 de enero de 2014].
11. Legere L. Hazards posed by natural gas drilling not always underground. *Scranton Times-Tribune*, Sección de Noticias, edición en línea (21 de junio de 2010). Disponible en: <http://goo.gl/L0k9OP> [consultada el 8 de enero de 2014].
12. Warner NR, et al. Impacts of shale gas wastewater disposal on water quality in western Pennsylvania. *Environ Sci Technol* 47(20):11849–11857 (2013); <http://dx.doi.org/10.1021/es402165b>.
13. EPA. Drinking Water Contaminants: Basic Information about Disinfection Byproducts in Drinking Water: Total Trihalomethanes, Haloacetic Acids, Bromate, and Chlorite [página web]. Washington, DC: Oficina del Agua, Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (actualizada el 13 de diciembre de 2013). Disponible en: <http://goo.gl/hnYbj> [consultada el 8 de enero de 2014].
14. Clark CE, Veil JA. Produced Water Volumes and Management Practices in the United States.

- ANL/EVS/R-09/1. Argonne, IL: División de Ciencias Ambientales, Laboratorio Nacional de Argonne (septiembre de 2009).
15. U.S. Environmental Protection Agency. Underground Injection Control Program: Criteria and Standards. 40CFR Part 146, Subpart C, Section 146.22: Construction Requirements. Washington, DC: Oficina de Imprenta del Gobierno de Estados Unidos (1° de Julio de 2012). Disponible en: <http://goo.gl/1U7fjX> [consultada el 8 de enero de 2014].
16. Flewelling SA, Sharma M. Constraints on upward migration of hydraulic fracturing fluid and brine. *Ground Water* 52(1):9–19 (2013); <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12095>.
17. Jackson RE, et al. Ground protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydrogeological research. *Ground Water* 51(4):488–510 (2013); <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23745972>.
18. Myers T. Potential contaminant pathways from hydraulically fractured shale to aquifers. *Ground Water* 50(6):872–882 (2012); <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00933.x>.
19. Warner NR, et al. Geochemical evidence for possible natural migration of Marcellus Formation brine to shallow aquifers in Pennsylvania. *Proc Natl Acad Sci USA* 109(30):11961–11966 (2012); <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1121181109>.
20. Drilling Waste Management Information System. Fact Sheet—Beneficial Reuse of Drilling Wastes [página web]. Argonne, IL: Laboratorio Nacional de Argonne (sin fecha). Disponible en: <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/> [consultada el 8 de enero de 2014].
21. Guerra K, et al. Oil and Gas Produced Water Management and Beneficial Use in the Western United States. Science and Technology Program Report No. 157. Denver, CO: Oficina de Reclamaciones, Departamento del Interior de Estados Unidos (septiembre de 2011). Disponible en: <http://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report157.pdf> [consultada el 8 de enero de 2014].
22. Poole H. State Policies on Use of Hydraulic Fracturing Waste as a Road Deicer. Hartford, CT: Oficina de Investigación Legislativa, Asamblea General de Connecticut (sin fecha). Disponible en: <http://www.cga.ct.gov/2013/rpt/2013-R-0469.htm> [consultada el 8 de enero de 2014].
23. PADEP. Special Conditions General Permit WMGR064. Harrisburg, PA: Departamento de Protección del Medio Ambiente de Pensilvania, Mancomunidad de Pensilvania (sin fecha). Disponible en: <http://www.portal.state.pa.us/portal/server.pt?open=18&objID=505511&mode=2> [consultada el 8 de enero de 2014].
24. Swann C, et al. Evaluations of Radionuclides of Uranium, Thorium, and Radium Associated with Produced Fluids, Precipitates, and Sludges from Oil, Gas, and Oilfield Brine Injections Wells in Mississippi, Final Report. University, MS: Instituto de Recursos Minerales de Mississippi/Departamento de Farmacología/Departamento de Geología e Ingeniería Geológica, Universidad de Mississippi (marzo de 2004). Disponible en: http://www.olemiss.edu/depts/mmri/programs/norm_final.pdf [consultada el 8 de enero de 2014].
25. Walter GR, et al. Effect of biogas generation on radon emissions from landfills receiving radium-bearing waste from shale gas development. *J Air Waste Manag Assoc* 62(9):1040–1049 (2012); <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2012.696084>.
26. STRONGER. Pennsylvania Follow-up State Review. Middletown, PA: State Review of Oil and Natural Gas Environmental Regulations, Inc. (septiembre de 2013). Disponible en: <http://goo.gl/DQhOIA> [consultada el 8 de enero de 2014].
27. OSHA. Health Hazard Information Bulletin: Potential Health Hazards Associated with Handling Pipe Used in Oil and Gas Production. Washington, DC: Administración de Seguridad y Salud Ocupacionales, Departamento del Trabajo de Estados Unidos (26 de enero de 1989). Disponible en: https://www.osha.gov/dts/hib/hib_data/hib19890126.html [consultada el 8 de enero de 2014].
28. PADEP. Oil & Gas Development Radiation Study [página web]. Harrisburg, PA: Departamento de Protección del Medio Ambiente de Pensilvania, Mancomunidad de Pensilvania (2014). Disponible en: <http://goo.gl/P22FQM> [consultada el 8 de enero de 2014].
29. EPA. The Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources: Progress Report. EPA 601/R-12/011. Washington, DC: Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency (December 2012). Disponible en: <http://goo.gl/4YfBka> [consultada el 8 de enero de 2014].
30. NRC. Health effects of radon progeny on non-lung-cancer outcomes. In: Health Effects of Exposure to Radon, BEIR VI. Washington, DC: Comité de Riesgos a la Salud de la Exposición al Radón (BEIR VI), National Research Council (Consejo Nacional de Investigación), National Academies Press (1999). Disponible en: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=5499&page=118 [consultada el 8 de enero de 2014].
31. EPA. Radionuclides: Radium [página web]. Washington, DC: Oficina de Aire y Radiación, Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (actualizada el 6 de marzo de 2012). Disponible en: <http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/radium.html#effecthealth> [consultada el 8 de enero de 2014].
32. EPA. Radioactive Waste from Oil and Gas Drilling. EPA 402-F-06-038. Washington, DC: Oficina de Aire y Radiación, Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (abril de 2006). Disponible en: <http://www.epa.gov/rpdweb01/docs/drilling-waste.pdf> [consultada el 8 de enero de 2014].
33. Kondash AJ, et al. Radium and barium removal through blending hydraulic fracturing fluids with acid mine drainage. *Environ Sci Technol* 48(2):1334–1342 (2014); <http://dx.doi.org/10.1021/es403852h>.