

## ANÁLISIS INTEGRAL DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES RELACIONADOS A LA FRACTURA HIDRÁULICA EN ARGENTINA

María Agustina de la Zerda<sup>1</sup>, Jorge Daniel Stripeikis<sup>2</sup>, Ramiro Sarandón<sup>3</sup>, Eleonora Erdmann<sup>2</sup>

1: Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), CONICET, mdlazerda@itba.edu.ar

2: Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), jstripei@itba.edu.ar, erdmann@itba.edu.ar

3: Universidad Nacional de La Plata, sarandon@fcnym.unlp.edu.ar

Palabras clave: fractura hidráulica, flowback, reúso, fluidos de fractura

### ABSTRACT

**Comprehensive analysis of environmental aspects related to hydraulic fracturing in Argentina.**

There are concerns regarding the exploitation of unconventional hydrocarbon reservoirs, particularly related to water supply, handling, final disposal, chemical safety and protection of aquifers. Approximately 10-40% of injected volume of fracture fluids returns to the surface after the hydraulic fracturing process. The flowback water not only includes the chemicals added, but may also contain various substances suspended from the formation. The general aim of this work is the analysis of environmental aspects associated with the extraction of unconventional hydrocarbons, especially completion fluids. A comprehensive analysis of the activity is accomplished, including legal aspects, environmental conditions and possible treatment technologies. The study includes the evaluation of the existing environmental legislative framework on areas whit exploration or exploitation of unconventional hydrocarbons and the analysis of effluent management strategy. The environmental conditions of these areas, such as climatic, geological, hydrological and ecological are analyzed. In this context, the chemical composition of flowback water and the possibility of its reuse in the activity are determined. A preliminary study of treatments for removal of critical parameters is performed. This study attempts to reduce the growing environmental concerns of regulatory agencies and general public.

### INTRODUCCIÓN

El aumento del uso de la fractura hidráulica en Argentina para la explotación de hidrocarburos no convencionales (HNC) genera un gran interés en los impactos ambientales de esta tecnología. Las mayores preocupaciones son el abastecimiento de agua, la manipulación y disposición final de los fluidos, la seguridad química y la protección de los acuíferos (Israel *et al.* 2015; Sarandón 2015).

La cantidad de agua necesaria para la fractura hidráulica es muy variable, depende de las características de la formación, del tipo de pozo y del número de etapas de fractura. Es posible hablar de un rango que va desde 5000 m<sup>3</sup> a 50000 m<sup>3</sup> de agua, por pozo, por única vez. Los pozos horizontales, con 30-40 etapas de fractura, consumen en el rango de los 30000 m<sup>3</sup> a 50000 m<sup>3</sup> de

agua. Como regla general, se puede decir que en el caso de shale, se calcula entre 1000 m<sup>3</sup> y 1200 m<sup>3</sup> de agua por etapa de fractura (IAPG 2018).

El fluido de fractura está formado por agua (92-94%), propante (6-7%) y aditivos químicos (1-2%). Estos aditivos consisten en diferentes productos químicos: geles, reticulantes, reductores de fricción, agentes de ruptura del gel, estabilizadores de pH, ácidos, inhibidores de corrosión, inhibidores de incrustaciones, estabilizadores de hierro, estabilizadores de arcilla, biocidas y tensioactivos (Ferrer y Thurman 2015). Alrededor del 10-40% del volumen inyectado de fluidos de fractura retorna a la superficie luego del proceso de fractura hidráulica y no sólo contiene los químicos añadidos, sino que también posee varias sustancias suspendidas de la formación (Annevelink *et al.* 2016).

El agua de retorno o flowback se define como el fluido que retorna, inmediatamente luego de fracturar, cuando el pozo es puesto a fluir (IAPG 2013; Li *et al.* 2016). Está constituida por el agua inyectada más los retornos de taponés, cemento, agente de sostén y fluido de fractura degradado. A medida que progresa en el tiempo entra también en su constitución agua de producción, petróleo y/o gas y minerales de formación disueltos por la misma. No existe definición estricta de cuando el flowback cambia de denominación a agua de producción ya que los mismos coexisten como una mezcla (IAPG 2013). Con respecto a los problemas de eliminación y reutilización, puede que no sea necesario distinguir entre el agua producida y el agua de retorno, ya que el agua de refluo suele ser manejada de manera similar al agua producida en la industria del petróleo. El flowback, por lo tanto, se puede considerar como una subcategoría de agua de producción (Li *et al.* 2016).

El tratamiento del agua de retorno, para la reutilización en la misma actividad, es una alternativa atractiva, especialmente en áreas con acceso limitado a pozos de eliminación y/o con problemas de escasez de agua. Comprender la composición del agua de retorno es esencial para evaluar su potencial de reutilización e implementar un proceso de tratamiento adecuado para mejorar la sustentabilidad del agua (Lester *et al.* 2015).

El tratamiento convencional de agua de producción incluye la separación por gravedad, flotación por aire disuelto, desmulsificación, coagulación y floculación. Sin embargo, existen numerosas desventajas asociadas con estas operaciones. Por ejemplo, la separación por gravedad puede producir efluentes que no cumplan los límites de descarga, el uso de rompedores de emulsiones químicas requiere grandes cantidades de productos químicos, se producen grandes volúmenes de lodo y los costos de operación pueden ser altos. Por otro lado, el uso de procesos de filtración con membrana como la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa ofrecen muchas ventajas para el tratamiento de aguas de producción: no requieren la adición de productos químicos, los costos de energía son a menudo más bajos y la planta puede ser altamente automatizada (Mondal y Wickramasinghe 2008). Lester *et al.* (2015) determinaron un proceso de tratamiento apropiado para el reciclado de flowback en futuras operaciones de fracturación basado en aireación/precipitación y/o filtración para la eliminación de hierro y sólidos suspendidos,

seguido de desinfección para la eliminación bacterias. Además de estos tratamientos, determinaron que puede ser necesario un tratamiento biológico para eliminar materia orgánica disuelta, seguido de desalinización por ósmosis inversa para alcanzar estándares de calidad de agua apropiados para otras opciones de reutilización de agua, por ejemplo, riego de cultivos.

Este estudio proporciona un análisis ambiental integral relacionado a la fractura hidráulica y un análisis preliminar para guiar la futura elección de un tratamiento adecuado para reúso del agua y, de esta manera, contrarrestar las crecientes preocupaciones ambientales de las agencias reguladoras y el público en general.

## **METODOLOGÍA**

### **Marco Normativo Ambiental**

El marco normativo ambiental determina las condiciones o restricciones en el manejo de los recursos naturales, la gestión de residuos y el requerimiento de ciertas tecnologías o prácticas. Por ejemplo, puede determinar la posibilidad o no de utilizar el agua subterránea, la obligatoriedad de gestionar los residuos especiales bajo ciertas normas y el requerimiento de incluir el tratamiento del agua de retorno antes de efectuar su vuelco en un cuerpo de agua.

Con el objetivo de evaluar el marco legislativo ambiental existente en distintas regiones en las que potencialmente se pudiera realizar la explotación de HNC, se efectuó una revisión y análisis del marco normativo general en Argentina y en las provincias de Neuquén, Mendoza, Santa Cruz y Salta.

### **Condiciones Ambientales**

Las condiciones del medio circundante, incluyendo los aspectos del medio natural (clima, geomorfología, ecología), así como del medio humano (aspectos sociales, económicos, territoriales o de infraestructura), establecen un marco de referencia potencialmente condicionante para el desarrollo de la actividad, ya sea porque presenta elementos frágiles o vulnerables, o porque impone condiciones operativas extremas (temperatura, altura sobre el nivel del mar).

La actividad a desarrollar debe incorporar ciertas prácticas o cuidados para evitar la ocurrencia de un daño ambiental, minimizar los impactos y alteraciones sobre los ecosistemas naturales o antropizados, ajustarse a condiciones extremas o evitar el incremento de riesgos naturales o antrópicos (hidrogeológicos, enfermedades, etc.). Esto es especialmente importante si la actividad se desarrolla dentro o en cercanía a un área natural protegida, a un sitio de valor histórico o patrimonial (paleontológico, geológico, natural, etc.), de importancia arqueológica o arquitectónica. Del mismo modo, ciertos aspectos del medio antrópico, como la presencia de grupos vulnerables,

comunidades y territorios aborígenes, actividades productivas (agropecuarias, cinegéticas, extractivas) o de servicios potencialmente vulnerables (turísticas, recreativas, deportivas, etc.), deben ser considerados para evitar conflictos socio-ambientales y lograr la aceptación y confianza de la comunidad local, en lo que se conoce como la licencia social.

Con el objeto de efectuar una evaluación preliminar del riesgo ambiental se procedió a un análisis estructurado, conceptual y cualitativo, en sectores específicos correspondientes a tres áreas de exploración y explotación de HNC: Cuenca Neuquina (Neuquén, Formación Vaca Muerta), Cuenca Golfo San Jorge (Santa Cruz, Formación Pozo D-129) y Cuenca Noroeste Paleozoica (Salta, Formación Los Monos). En cada una de ellas, se localizaron 10 sitios de análisis en áreas de concesión para exploración y/o explotación, utilizando como referencia el mapa de concesiones de la Secretaría de Energía, correspondiendo en su mayoría a pozos existentes, complementado con sitios que presentaban distintas condiciones ambientales (Figs. 1, 2 y 3)



Figura 1. Puntos de análisis en Neuquén (Cuenca Neuquina, Formación Vaca Muerta).

## Caracterización del Agua de Flowback

Las muestras de agua de flowback analizadas fueron entregadas bajo un acuerdo de confidencialidad. Se analizaron tres muestras de aguas de retorno correspondientes a tres pozos diferentes. La selección de los parámetros examinados se basó en trabajos publicados con

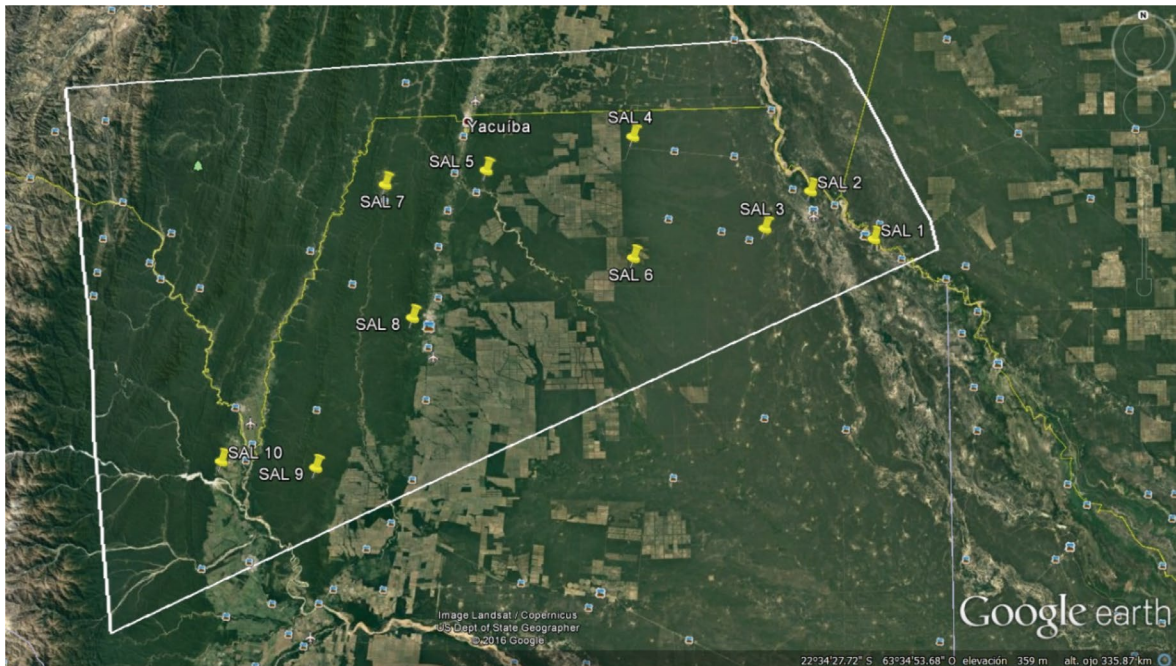


Figura 2. Puntos de análisis en Salta (Cuenca Noroeste Paleozoica, Formación Los Monos).

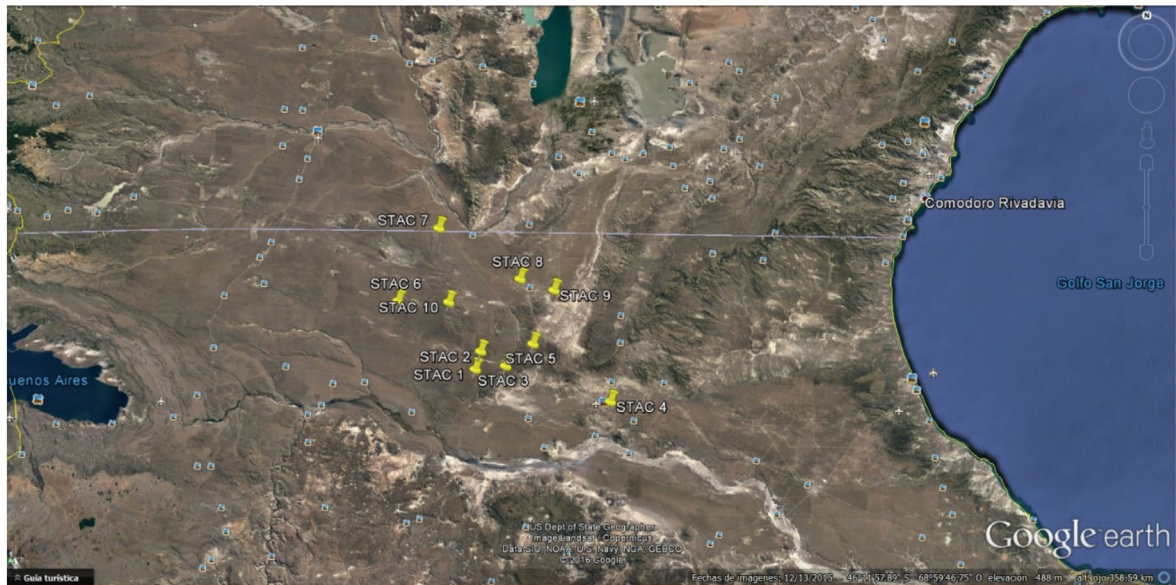


Figura 3. Puntos de análisis en Santa Cruz (Cuenca Golfo San Jorge, Formación Pozo D-129).

potenciales elementos presentes en aguas de retorno (Lester *et al.* 2015; Rosenblum *et al.* 2017; Oetjen *et al.* 2018).

El contenido de cloruros (Cl<sup>-</sup>) y cloruro de sodio (NaCl) se determinó a través de los Métodos estándar para la examinación de aguas y aguas residuales (Clesceri *et al.* 1998). El pH se determinó

empleando el instrumento Adwa AD1030. La conductividad se determinó mediante el instrumento Hanna HI2300. Finalmente, el contenido de carbono total (TC), carbono inorgánico total (IC) y carbono orgánico total (TOC) se determinó empleando un analizador TOC-VCPH (Shimadzu Corp., Japón).

### Condiciones para el Reúso del Agua

En el presente trabajo se realizó un estudio preliminar de la posibilidad de aprovechamiento del agua de flowback para su reúso en la actividad y los tratamientos necesarios para la remoción de los parámetros críticos.

El agua usada para preparar fluidos de fractura debe poseer algunas características mínimas de calidad de manera que no interactúe negativamente con los componentes usados para preparar el mismo. Los problemas más usuales pueden ser alargamiento de los tiempos de hidratación, ruptura prematura del gel, baja eficiencia de los surfactantes, pérdida de eficiencia de los reductores de fricción, degradación de los geles, tiempos de reticulado muy largos (IAPG 2013). En la Tabla 1 se presentan las especificaciones que debería cumplir el agua para preparar un fluido de fractura estándar.

| Parámetro                            | Rango o valor recomendado |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Temperatura (°C)                     | 15 – 40                   |
| TDS (mg/L)                           | < 50000                   |
| TSS(mg/L)                            | < 50                      |
| Turbidez (NTU)                       | 0 – 5                     |
| pH                                   | 6 – 8                     |
| Hierro (mg/L)                        | 1 – 20                    |
| Cloruros (mg/L)                      | < 30000                   |
| Potasio (mg/L)                       | 100 – 500                 |
| Calcio (mg/L)                        | 50 – 250                  |
| Magnesio (mg/L)                      | 10 – 100                  |
| Sodio (mg/L)                         | 2000 – 5000               |
| Boro (mg/L)                          | 0 – 20                    |
| Carbonatos (mg/L)                    | < 600                     |
| Dureza como CaCO <sub>3</sub> (mg/L) | < 15000                   |
| Bicarbonato (mg/L)                   | < 600                     |
| Bacterias (CFU/mL)                   | 0                         |
| Sílice (mg/L)                        | < 35                      |
| Sulfatos (mg/L)                      | < 500                     |
| Agentes reductores (mg/L)            | 0                         |

Tabla 1. Especificaciones del agua para preparar fluidos de fractura (IAPG 2013).

## RESULTADOS

### Evaluación del Marco Legal

Las actividades hidrocarburíferas están alcanzadas por distintos tipos de normas ambientales: las generales y las específicas de la actividad y de cada sector. La Constitución Nacional Argentina en el artículo 41 incorpora explícitamente el derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras. Por otro lado, en diferentes cuerpos normativos se encuentran las leyes ambientales, nacionales y provinciales que contienen los principios y criterios de gestión ambiental.

La Formación Vaca Muerta abarca las provincias de Neuquén y Mendoza, la Formación Pozo D-129 se extiende por Chubut y Santa Cruz y la Formación Los Monos se localiza en las provincias de Jujuy y Salta.

En relación a la actividad no convencional, tanto Neuquén como Mendoza cuentan con normativa específica de la actividad. En Neuquén, el Decreto 1483/12 establece las normas y procedimientos tanto para la exploración como para la explotación de reservorios de HNC. Según esta disposición, para el tratamiento de agua de flowback se permiten únicamente las siguientes alternativas de disposición: reúso en la industria hidrocarburífera, reúso en riego asociado a un proyecto productivo o de recomposición ambiental y disposición final en un pozo sumidero. Asimismo, se prohíbe la utilización de agua subterránea para las etapas de perforación y terminación.

Mendoza no contaba con una regulación específica de la actividad no convencional. Sin embargo, en los últimos tiempos comenzó la explotación de recursos no convencionales en la zona, por lo que el gobierno provincial estableció un control más riguroso, a fin de compatibilizarlas con el cuidado del ambiente y la sostenibilidad del sistema ecológico. El Decreto Provincial 248/18 establece la obligatoriedad de tramitar el procedimiento de evaluación de impacto ambiental de los proyectos de exploración y explotación en reservorios no convencionales. Para el procedimiento de estimulación a través de fractura hidráulica en formaciones no convencionales, el estudio debe contener la información de profundidad de los acuíferos, distancia a fuentes de aguas superficiales, origen del agua de fractura, cantidad total a utilizar y permiso de uso de agua por parte de la autoridad competente. Por otra parte, debe especificar el almacenamiento del agua de fractura, los productos químicos a utilizar (descripción, volúmenes, concentraciones, grado de toxicidad), el proceso del sistema de tratamiento del agua de retorno, su almacenamiento y disposición final.

En Mendoza, el agua de fractura para el caso de yacimientos en producción debe provenir preferentemente del agua de formación. Está prohibido durante las etapas de perforación, explotación y terminación de pozos no convencionales, la utilización del agua subterránea con aptitud para satisfacer el abastecimiento a poblaciones y otros usos productivos. Por otro lado, el

agua de retorno no puede ser vertida sobre cuerpos de aguas superficiales, como así también no puede ser almacenada previa y durante su tratamiento en receptáculos a cielo abierto. Está prohibido su vertido en piletas de infiltración y/o evaporación, pozos absorbentes, cavados, perforados, sumideros o inyectores, que puedan estar vinculados a acuíferos y que sean susceptibles de alterar la calidad de las aguas subterráneas. A su vez, el permisionario, concesionario y/u operador, debe presentar a la Autoridad Ambiental los análisis físicos-químicos de las aguas de retorno.

Tanto Neuquén como Santa Cruz establecen límites máximos de efluentes líquidos vertidos en agua y los respectivos métodos de análisis. Por otro lado, Salta y Santa Cruz poseen una normativa hidrocarburífera provincial general y actualmente ninguna relacionada a la actividad no convencional.

### **Evaluación Preliminar Ambiental**

Se analizó 20 indicadores ambientales para cada uno de los sitios analizados (10 sitios por cada provincia seleccionada): del medio físico natural (temperatura, precipitaciones, relieve, vientos, profundidad freática, cercanía a humedal, recursos hídricos, aptitud del suelo, intermitencia hidrológica), del medio biótico (eco-región, diversidad fisonómica, ecosistemas de altura, ecosistemas protegidos) y del medio humano (infraestructura, servicios, gestión de residuos, centros poblados, zonas productivas, estructura territorial, patrimonio histórico), permitiendo efectuar una evaluación preliminar del riesgo ambiental (De La Zerda *et al.* 2017).

En Salta, los indicadores que mostraron mayor valor de riesgo fueron debidos a la falta de infraestructura y servicios, seguidos por las altas precipitaciones, la gran sensibilidad de la eco-región, la gran diversidad fisonómica de la vegetación, la presencia de ecosistemas protegidos, la dificultad en implementar sistemas de gestión de residuos peligrosos en la zona y la falta de una organización territorial. En esta área, los indicadores que mostraron menores valores de riesgo fueron debidos a las altas temperatura y los vientos moderados.

En Neuquén, el indicador que mostró mayor valor de riesgo se debió a los fuertes vientos existentes en la región, seguido por las bajas temperaturas, la falta de infraestructura y servicios en la zona y la estructura territorial. En esta área, los indicadores que mostraron menores valores de riesgo fueron debidos a la profundidad de la napa freática, la infraestructura de regulación del sistema hidrológico existente en este sector, el hecho de no encontrarse en zona de altura y la carencia de vestigios de patrimonio histórico.

Por su parte, en Santa Cruz, el indicador que mostró el valor más alto se debió a los fuertes vientos y la carencia de infraestructura y servicios, seguido por la carencia de recursos hídricos y la estructura territorial de la región. En esta área, los indicadores que mostraron menores valores de riesgo fueron debidos a la baja aptitud de uso del suelo, la escasa diversidad fisonómica de la vegetación, la baja cota de la región, la inexistencia de actividad en zonas protegidas, la poca

presencia de centros poblados y de actividad productiva en la región y la baja presencia de registros de patrimonio histórico.

Es posible que de muestrearse otros sectores ocurran valores mayores o menores en algunos de los indicadores, ya que estos valores responden a la realidad existente en el área de aplicación que corresponde a un rectángulo de 10x10 km (100 km<sup>2</sup>). Esta evaluación es de escala regional y subregional, pudiéndose realizar con información publicada y antecedentes regionales, geográficos y ecológicos. Esta información puede ser complementada (como ha sido el caso en el presente estudio), con información proveniente de sensores remotos (aerofotografías, imágenes satelitales), siendo adecuado utilizar, por ejemplo, el Google Earth. Los sensores remotos proveen suficiente información sobre el relieve y las geformas, la cobertura del suelo, el tipo de vegetación, y la cercanía a cuerpos de agua. Se puede estimar los usos del suelo (agricultura, ganadería, plantaciones forestales), la infraestructura (caminos, tendidos eléctricos), los centros poblados (superficie, extensión), las áreas de manejo especial (áreas naturales protegidas, territorios aborígenes), la estructura territorial, etc.; permitiendo el mapeo del área de estudio.

### Caracterización del Agua de Flowback

En la Tabla 2 se presenta las principales características de las muestras de aguas de flowback. La calidad de estas aguas se observa en la Fig. 4. Las muestras presentaron un aspecto turbio y, después de un cierto tiempo de residencia, se produce la precipitación de materia en suspensión.

| Muestra                     | A       | B       | C        |
|-----------------------------|---------|---------|----------|
| pH                          | 6,0     | 5,7     | 6,0      |
| Conductividad a 7°C (mS/cm) | 63,2    | 73,9    | 194,4    |
| Cl <sup>-</sup> (mg/L)      | 29890,7 | 28091,3 | 107816,5 |
| NaCl (mg/L)                 | 49319,7 | 46350,6 | 177897,3 |
| TC (mg/L)                   | 182,4   | 1057    | 342,6    |
| IC (mg/L)                   | 76,6    | 53,3    | 39,2     |
| TOC (mg/L)                  | 105,8   | 1003,7  | 303,4    |

Tabla 2. Principales características de las aguas de flowback.

Los valores de salinidad son los esperables ya que son compatibles con los encontrados en bibliografía. El IAPG en una Práctica Recomendada sobre gestión del agua (2013) muestra dos ejemplos de análisis fisicoquímicos realizados en aguas de retorno. En un caso se presenta valores de conductividad a 25°C de 176 mS/cm y de cloruros de 59000 mg/L y en otro caso valores de conductividad a 25°C de 217 mS/cm y de cloruros de 69000 mg/L. Los valores de conductividad eléctrica obtenidos pueden explicarse por el alto contenido de sales.

Se obtuvo valores similares de cloruros para las muestras A (29890,7 mg/L) y B (28091,3

mg/L). Sin embargo, la salinidad puede variar de un pozo a otro ya que depende de la geología de la formación. En el caso de la muestra C, el contenido de cloruros (107816,56 mg/L) puede representar un desafío en el tratamiento del agua, ya que la práctica recomendada para reúso recomienda valores menores a 30000 mg/L de cloruros.

El contenido de TOC puede deberse a los compuestos orgánicos normalmente presentes en el fluido de fractura (goma guar, poliacrilamida, glutaraldehído y diversos tensioactivos), como así también hidrocarburos liberados directamente de la formación (Kong *et al.* 2017).



Figura 4. Muestras de aguas de flowback.

## Tratamientos del Agua de Flowback

La reutilización de agua de flowback y agua de producción representa un desafío por la calidad variable del agua, los bajos volúmenes de agua de retorno y la falta de orientación sobre los objetivos de calidad del agua para reúso en la industria (Rosenblum *et al.* 2017). Sin embargo, el potencial reúso de agua puede ayudar a contrarrestar las crecientes preocupaciones ambientales de las agencias reguladoras y el público en general.

Cualquiera sea el tratamiento para reúso, es prioridad remover la materia orgánica, los sólidos suspendidos y lograr una remoción parcial de minerales solubles y metales para lograr soluciones termodinámicamente estables. Por otro lado, requiere especial atención la remoción de boro para la reutilización del agua de flowback. Su presencia en el agua a tratar provendría de las sales de borato y/o ácido bórico añadidos para reticular el fluido de fractura y, de esta manera, aumentar la viscosidad del gel lineal. Su remoción es necesaria ya que puede reticular prematuramente el fluido, afectando negativamente al bombeo y a la fractura (Ezechi *et al.* 2014; Sari y Chellam 2015;

Chorghe *et al.* 2017; Bu *et al.* 2018).

La selección de la tecnología más adecuada para el tratamiento de aguas residuales, depende de las características del agua, del volumen a tratar y del uso final. Para el reúso de aguas de flowback, se estudiaron las siguientes alternativas de tratamiento:

### Coagulación química

La coagulación química y floculación involucran la adición de químicos de manera de cambiar el estado físico de partículas suspendidas y disueltas para lograr su remoción mediante asentamiento y filtración. Se trata de un proceso efectivo para reducir la turbidez y los hidrocarburos. Se pueden emplear como coagulantes cloruro férrico o clorhidrato de aluminio. Sin embargo, al elegir el coagulante, una variable importante a considerar es la solubilidad y cómo impacta aguas abajo del proceso. Los coagulantes de aluminio tienen una mayor solubilidad comparada al hierro, motivo por el cual pueden afectar aguas abajo (Rosenblum *et al.* 2016).

Por otro lado, en tratamiento con membranas, la coagulación es un método efectivo para mejorar la calidad del agua y reducir el ensuciamiento de la membrana. Con el incremento de la dosis de coagulante, se reduce en gran medida surfactantes y poliacrilamida (Kong *et al.* 2017; Chorghe *et al.* 2017).

Chorghe *et al.* (2017) evaluaron el uso de coagulantes para clarificación y eliminación de boro del agua de retorno. Sin embargo, demostraron que no es un proceso factible en aguas de muy alto contenido de boro, ya que se necesitaría una dosis alta de coagulante. La mayor absorción de boro en hidróxidos de hierro y aluminio durante la coagulación química se produce a un pH ligeramente alcalino de 8 cuando el ácido bórico neutral es dominante.

### Electrocoagulación

La electrocoagulación se basa en la producción de hidróxidos metálicos como coagulantes dentro de la muestra durante la reacción electroquímica mediante la disolución del material del ánodo. La oxidación del material del ánodo libera electrones que forman complejos de hidróxidos metálicos que neutralizan los materiales particulados en suspensión para formar aglomerados. Los aglomerados se depositan en la parte inferior o flotan hacia la superficie (Ezechi *et al.* 2014).

La electrocoagulación permite la remoción de coloides y compuestos orgánicos disueltos. Las ventajas de este método son: no requiere el agregado de ningún líquido, equipo simple, fácil operación, bajo mantenimiento, efluente sin color ni olor, baja producción de barros y eficiente remoción. Por otro lado, los flóculos son más grandes, con menos agua ligada, resistente a ácidos y más estables, por lo que pueden ser fácilmente más separados. Las desventajas son el uso de electricidad y cambio de electrodos de sacrificio (Sardari *et al.* 2018).

Ezechi *et al.* (2014) investigaron las condiciones óptimas de operación (pH, carga, tiempo de contacto y el espaciado entre electrodos) para la eliminación de boro en agua de producción mediante electrocoagulación. A partir de una concentración inicial de boro de 15 mg/L lograron obtener una concentración final de 0,3 mg/L.

## **Tratamiento con membranas**

Las ventajas del tratamiento con membranas son la alta calidad del permeado, fácil operación, baja generación de lodo y baja cantidad de químicos y energía, en comparación con otros tratamientos. La mayor desventaja la constituye el ensuciamiento de la membrana (Jiménez *et al.* 2017). A modo de pretratamiento, para remover TOC y turbidez, pueden emplearse la coagulación y ultrafiltración (Kong *et al.* 2018).

### **Microfiltración**

La microfiltración se utiliza para separar sólidos suspendidos y reducir la turbidez. Si se emplea coagulación y floculación como un pretratamiento para una membrana de microfiltración, se producen menos incrustaciones y la eficacia de eliminación de hidrocarburos aumenta un 95,6% (Jiménez *et al.* 2017).

### **Ultrafiltración**

La ultrafiltración se utiliza para remover olor, color, virus y materia orgánica coloidal. En comparación con la microfiltración, este proceso presenta mayor eficiencia en la remoción de hidrocarburos y sólidos suspendidos (Jiménez *et al.* 2017).

### **Nanofiltración**

La nanofiltración es una tecnología de tratamiento con membranas que logra una buena remoción de iones multivalentes. Estas membranas rechazan compuestos orgánicos mientras que rechazan pobremente sales monoatómicas como NaCl. Por lo tanto, normalmente se asume que la nanofiltración es la mejor opción para equilibrar la calidad y los costos de energía (Jiménez *et al.* 2017).

Kong *et al.* (2018) emplearon la membrana NF90 de nanofiltración, en un rango de presión de 1,8 a 7,2 bar, para el tratamiento de aguas de flowback en China y obtuvieron una buena eficiencia de remoción de Cl<sup>-</sup> (83,3%) y Na<sup>+</sup> (81,2%). Dischinger *et al.* (2017) utilizaron la membrana NF270 de nanofiltración, a una presión de 27 bar, para el tratamiento de aguas de flowback en Colorado y obtuvieron un buen rechazo de compuestos orgánicos y un pobre rechazo de sales monoatómicas.

## Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un método que fuerza el pasaje de agua a través de la membrana contra la presión osmótica y requiere una gran fuente de energía, que se traduce en una gran presión de alimentación. Se trata de una buena tecnología para desalinización de aguas de flowback. Sin embargo, con concentraciones extremadamente altas de sal, este método se vuelve antieconómico (Platt *et al.* 2011).

Kong *et al.* (2018) emplearon la membrana ESPA1 de ósmosis inversa, en un rango de presión de 2,8 a 13 bar, para el tratamiento de aguas de flowback en China y obtuvieron una buena eficiencia de remoción de Cl<sup>-</sup> (87,3%) y Na<sup>+</sup> (88,1%). Dischinger *et al.* (2017) utilizaron la membrana SW30HR de ósmosis inversa, a una presión de 27 bar, para el tratamiento de aguas de flowback en Colorado y obtuvieron muy buenos resultados ya que éstas membranas rechazan muy bien todos los solutos.

## CONCLUSIONES

Existe la expectativa de que la explotación hidrocarburos no convencionales contribuya a satisfacer la creciente demanda de energía. Sin embargo, las preocupaciones ambientales de las agencias reguladoras y del público en general son cada vez mayores.

La evaluación del marco legal, en conjunto con la evaluación ambiental del sitio, permite definir o ajustar la complejidad tecnológica y el sistema de gestión ambiental a utilizar. Las provincias de Neuquén y Mendoza presentan un avance en relación a la normativa de la actividad no convencional.

El tratamiento del flowback para la reutilización es una alternativa atractiva, especialmente en áreas con escasez de agua. La selección de la tecnología más adecuada para el tratamiento de aguas residuales depende de las propiedades específicas, de los contaminantes del efluente y del volumen de agua a tratar. Por este motivo, es de suma importancia conocer la composición del agua y la calidad del agua a la cual se quiere llegar.

El tratamiento de agua mediante coagulación-floculación o electrocoagulación para remover sólidos y compuestos orgánicos, es ampliamente conocido. En trabajos futuros se analizará la factibilidad de procesos de tratamientos con membranas para el agua de flowback, debido a sus grandes ventajas (alta calidad del permeado, fácil operación, baja generación de lodo, baja cantidad de químicos y energía), en conjunto con el estudio del ensuciamiento de las membranas.

La elección del método de tratamiento más apropiado dependerá, además, de los intereses de las industrias y de un balance económico. Por este motivo, el desafío es encontrar el proceso óptimo que cumpla con todas las necesidades.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Buenos Aires por el soporte financiero y académico aportado.  
Al Ing. Jorge Ponce por su disponibilidad ante cualquier consulta realizada.

## REFERENCIAS CITADAS

- Annevelink, M.P.J.A., J.A.J. Meesters y A.J. Hendriks, 2016, "Environmental contamination due to shale gas development", *Science of the Total Environment*, 550, p. 431-438.
- Bu, T., F. Chen, X. He, Y. Yang y W. Wang, 2018, "Researching the complexing conditions of residual boron in produced water from oil & gas fields", *Process Safety and Environment Protection*, 116, p. 254-261.
- Chorghé, D., M.A. Sari y S. Chellam, 2017, "Boron removal from hydraulic fracturing wastewater by aluminum and iron coagulation: Mechanisms and limitations", *Water Research*, 126, p. 481-487.
- Clesceri, L.S., A.E. Greenberg y A.D. Eaton, 1998, "Standard methods for the examination of water and wastewater", American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Edición N°20, 2671 p.
- De La Zerda, M.A., E. Erdmann y R. Sarandón, 2017, "Importance of the study of environmental aspects in the exploitation of unconventional reservoirs for risk assessment of the activity in Argentina", *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference 2017*, Buenos Aires, Argentina, SPE-185546-MS, 15 p.
- Dischinger, S.M., J. Rosenblum, R.D. Noble, D.L. Gin y K.G. Linden, 2017, "Application of a lyotropic liquid crystal nanofiltration membrane for hydraulic fracturing flowback water: selectivity and implications for treatment", *Journal of Membrane Science*, 543, p. 319-327.
- Ezechi, E.H., M.H. Isa, S.R.M. Kutty y A. Yaqub, 2014, "Boron removal from produced water using electrocoagulation", *Process Safety and Environmental Protection*, 6 p.
- Ferrer, I. y E.M. Thurman, 2015, "Chemical constituents and analytical approaches for hydraulic fracturing waters", *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 5, p. 18-25.
- IAPG, 2013, "Gestión del agua en la exploración y explotación de reservorios no convencionales en el área de influencia de la Cuenca Neuquina", 28 p.
- IAPG, 2018, Sitio Web del Instituto Argentino del Petróleo y el Gas, < <http://www.shaleenargentina.com.ar>>, Uso de Agua. Acceso 6 de mayo de 2018.
- Israel, A.L., G. Wong-Paredi, T. Webler y P.C. Stern, 2015, "Eliciting public concerns about an emerging energy technology: The case of unconventional shale gas development in the United States", *Energy Research & Social Science*, 8, p. 139-150.
- Jiménez, S., M.M. Micó, M. Arnaldos, F. Medina y S. Contreras, 2017, "State of the Art of Produced Water Treatment", *Chemosphere*, 192, p. 186-208.
- Kong, F-x., J-f Chen, H-m. Wang, X-n. Liu, X-m. Wang, X. Wen, C-m. Chen y Y.F. Xie, 2017, "Application of coagulation-UF hybrid process for shale gas fracturing flowback water recycling: Performance and fouling analysis", *Journal of Membrane Science*, 524, p. 460-469.

- Kong, F-x, G-d Sun, J-f. Chen, J-d. Han, C-m. Guo, Tong-Zhang, X-f. Lin y Y.F. Xie, 2018, "Desalination and fouling of NF/low pressure RO membrane for shale gas fracturing flowback water treatment", *Separation and Purification Technology*, 195, p. 216-223.
- Lester, Y., I. Ferrer, E.M. Thurman, K.A. Sitterley, J.A. Korak, G. Aiken y K.G. Linden, 2015, "Characterization of hydraulic fracturing flowback water in Colorado: Implications for water treatment", *Science of the Total Environment*, 512-513, p. 637-644.
- Li, L., G.A. Al-Muntasheri y F. Liang, 2016, "A review of crosslinked fracturing fluids prepared with produced water", *Petroleum*, 2, p. 313-323.
- Mondal, S. y S.R. Wickramasinghe, 2008, "Produced water treatment by nanofiltration and reverse osmosis membranes", *Journal of Membrane Science*, 322, p. 162-170.
- Oetjen, K., K.E. Chan, K. Gulmark, J.H. Christensen, J. Blotevogel, T. Borch, J.R. Spear, T.Y. Cath y C.P. Higgings, 2018, "Temporal characterization and statistical analysis of flowback and produced waters and their potential for reuse", *Science of the Total Environment*, 619-620, p. 654-664.
- Platt, F.M., D.B. Burnett, U.M. Eboagwu y C.J. Vavra, 2011, "Pre-treatment options for frac flow back brines: Laboratory and pilot plant testing of oil removal materials", *CSUG/SPE 147417*, 13 p.
- Rosenblum, J., A.W. Nelson, B. Ruyle, M.K. Schultz, J.N. Ryan y K.G. Linden, 2017, "Temporal characterization of flowback and produced water quality from a hydraulically fractured oil and gas well", *Science of the Total Environment*, 596-597, p. 369-377.
- Rosenblum, J.S., K.A. Sitterley, E.M. Thurman, I. Ferrer y K.G. Linden, 2016, "Hydraulic fracturing wastewater treatment by coagulation-adsorption for removal of organic compounds and turbidity", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, p. 1978-1984.
- Sarandón, R., 2015, "Impacto ambiental de la explotación de los recursos no convencionales", en Riavitz *et al.*, "Recursos Hidrocarbúricos No Convencionales Shale y el Desarrollo Energético de la Argentina: Caracterización, Oportunidades, Desafíos", Eudeba, Cap 5, p. 345-426.
- Sardari, K., P. Fyfe, D. Lincicome y S.R. Wickramasinghe, 2018, "Aluminium electrocoagulation followed by forward osmosis for treating hydraulic fracturing produced waters", *Desalination*, 428, p. 172-181.
- Sari, M.A. y S. Chellam, 2015, "Mechanisms of boron removal from hydraulic fracturing wastewater by aluminum electrocoagulation", *Journal of Colloid and Interface Science*, 458, p. 103-111.



**10<sup>o</sup>** CONGRESO DE  
**EXPLORACIÓN Y  
DESARROLLO DE  
HIDROCARBUROS**

Energía y Sociedad  
aliados inseparables  
**Mendoza 2018**