

Calidad de agua

Estudio y mejora sustentable en Yacimiento Aguada Toledo

Por *N. Castaño, A. Castillo, R. Balderrama y J. P. Musotto* (YPF)

La sustentabilidad de los proyectos de recuperación secundaria de petróleo está asociada a las buenas prácticas de implementación y monitoreo. Este trabajo desarrolla una metodología exitosa enfocada en mejorar y mantener la calidad de agua en el yacimiento Aguada Toledo (Neuquén), que permitió incrementar el tiempo de vida media de inyección sentando las bases para la implementación de un proyecto piloto de reparación y acondicionamiento de pozos inyectoros.

El yacimiento Aguada Toledo-Sierra Barrosa se encuentra al Sur del Embalse artificial Los Barreales, aproximadamente a 70 km al ONO de la ciudad de Neuquén, a 25 km al NE de la ciudad de Plaza Huincul y a 30 km al SSO del yacimiento Loma La Lata. Se trata de un campo productor de petróleo desde 1957, con diversas etapas de explotación. La recuperación secundaria comenzó con un piloto en 1998, y pasó por dos etapas de masificación durante 2002 y 2012, en las cuales se lograron inyecciones de 6.500 m³/d y 12.600 m³/d, respectivamente (Figura 1).

Desde fines de 2015 y principios de 2016 se ha observado un descenso significativo del tiempo de vida media de inyección, como consecuencia del taponamiento de pozos inyectoros, que se ha manifestado a nivel de campo,

contribuyendo a la disminución de neta asociada, como se muestra en la Evolución de inyección y producción en Aguada Toledo-Sierra Barrosa (Figura 2).

La barra de color negro indica el pico de inyección producto de la puesta en marcha de los últimos pozos inyectoros convertidos en el proyecto. A partir de marzo 2016, el régimen de inyección desciende desde los 15.500 m³/d a valores de 10.000 m³/d, en gran parte producto del taponamiento. De continuar bajo estas condiciones se verían comprometidas las reservas PD asociadas al proyecto además de incumplir el Plan de Producción Anual 2016/2017.

En función de la criticidad del problema, se conformó un equipo multidisciplinario enfocado en la identificación y corrección de los parámetros más relevantes que afectan la calidad de agua. Se realizaron diversos análisis, a saber:

- Determinación del aporte másico y volumétrico de cada corriente al sistema de inyección y planta de tratamiento, diferenciando componentes críticos de calidad de agua.
- Análisis de la evolución de oxígeno, sulfuros, bacterias, HC y sólidos a nivel sistema.
- Análisis y seguimiento de la evolución de los compuestos taponantes de cada corriente del sistema.
- Mapeo de compuestos férricos y ferrosos en el sistema de inyección.

- Análisis DRX, SEM y ADN de muestras frescas de taponamiento.
- Evaluación de la performance de intervenciones con CTU/*Pulling*.
- Análisis declinatorio/económico de cada *pattern* afectado a merma de inyección.

Desarrollo

La condición de taponamiento que presentaba el yacimiento es representado en la Figura 3: Distribución del estado inyección de mandriles y componentes representativos del agua. Se puede observar que un 61% de mandriles no cumplen con el programa de inyección teórico establecido por reservorio, mientras que un 39% se encontraba en el rango de inyección especificado.

Dada esta situación, se conformó un equipo interdisciplinario de trabajo formado por ingenieros de reservorios, de producción, de procesos, supervisores de mantenimiento operativo, jefe de planta de petróleo y agua y el sector de integridad y tratamientos químicos. Las aristas de este grupo de trabajo fueron las siguientes:

- Agua de inyección: mejorar la calidad del agua de inyección identificando la causa raíz que afecta la misma y lograr estabilidad en los parámetros.



Figura 1. Ubicación geográfica del Yacimiento Aguada Toledo-Sierra Barrosa.

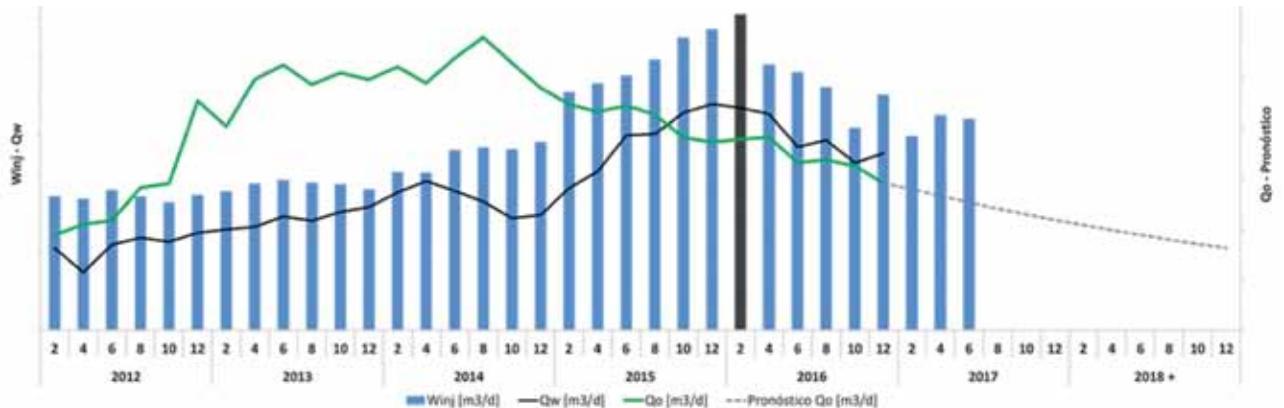


Figura 2. Evolución de inyección y producción en Aguada Toledo-Sierra Barrosa.

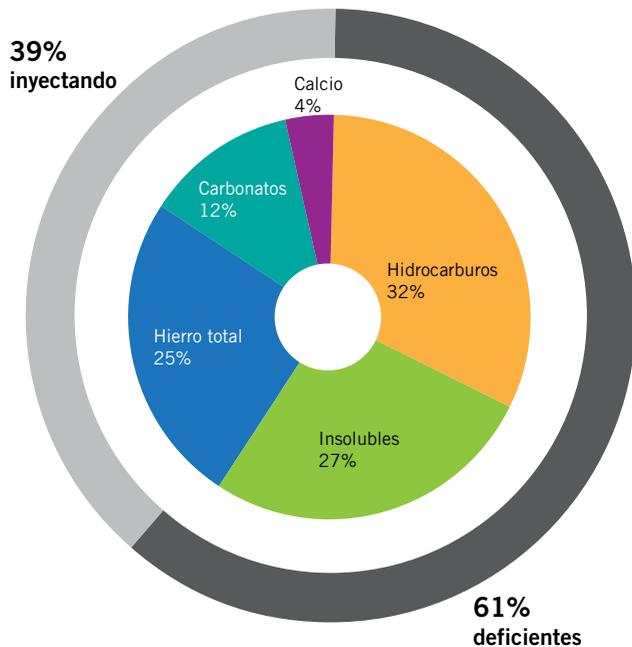


Figura 3. Distribución del estado inyección de mandriles y componentes representativos del agua.

- Monitoreo de inyectoras: focalizar acciones en pozos inyectoras y realizar un seguimiento exhaustivo.
- Campaña de intervenciones: lograr una campaña exitosa de intervenciones a pozos productores e inyectoras, al menor costo.

El primer desafío del equipo fue estudiar el mecanismo de daño que ocurre a nivel del reservorio para comprender el origen de la pérdida de inyectividad en los plays productivos. Se diseñó, en conjunto con el sector de tecnología de YPF, una serie de ensayos con plugs de coronas representativas de la Formación Lotena para determinar los parámetros de calidad de agua específicos y necesarios para el reservorio. Adicionalmente, se relevó toda la información

disponible sobre informes petrofísicos y petrográficos, análisis fisicoquímicos de agua de formación e inyección con el fin de integrarla a los cálculos necesarios y obtener así los parámetros mencionados.

Se utilizó el modelo de Barkman y Davidson (SPE 3543) adaptado a medios porosos para la estimación de los requerimientos de calidad de agua de inyección y el método publicado por Adriana Cavallaro (Petroleum Society, paper 2000-52) para predecir la declinación de la inyectividad. Este método utiliza los resultados obtenidos de ensayos de flujo lineal sobre testigos corona que a posteriori permiten predecir la declinación de inyectividad, expresada como tiempo de vida media del pozo inyector.

Conocer la distribución de tamaños de garganta poral del reservorio es relevante para evaluar la calidad de agua de inyección. En conjunto con el laboratorio de la Universidad Nacional de Cuyo se han realizado ensayos de presión capilar por inyección de mercurio en muestras de roca representativas de los distintos niveles productivos de la Formación Lotena seleccionadas y caracterizadas por los geólogos operativos del yacimiento. El valor representativo de tamaño de garganta poral que se utilizó en los cálculos corresponde a la mediana de la serie de valores: 12 μm .

Otro dato necesario para estimar el tiempo de vida media es la distribución de tamaño de partículas de los sólidos presentes en el agua de inyección. Se consideró como valor representativo la mediana de la serie de datos. El informe de laboratorio sobre las muestras analizadas de la salida de la planta de tratamiento permitió conocer que la mediana de diámetros de partículas es de 7 μm (el 88% de las partículas presentes en el agua tiene un tamaño mayor).

A partir de los valores de tamaño de garganta poral y de distribución de tamaño de partículas se puede estimar el tipo de daño provocado por la regla de predicción $1/3 - 1/7$, la cual permite clasificar los mecanismos de daño que existen por depositación de sólidos e hidrocarburos de la siguiente forma:

- ✓ Daño externo: provocado por partículas cuyo tamaño es mayor a $1/3$ del tamaño de garganta poral

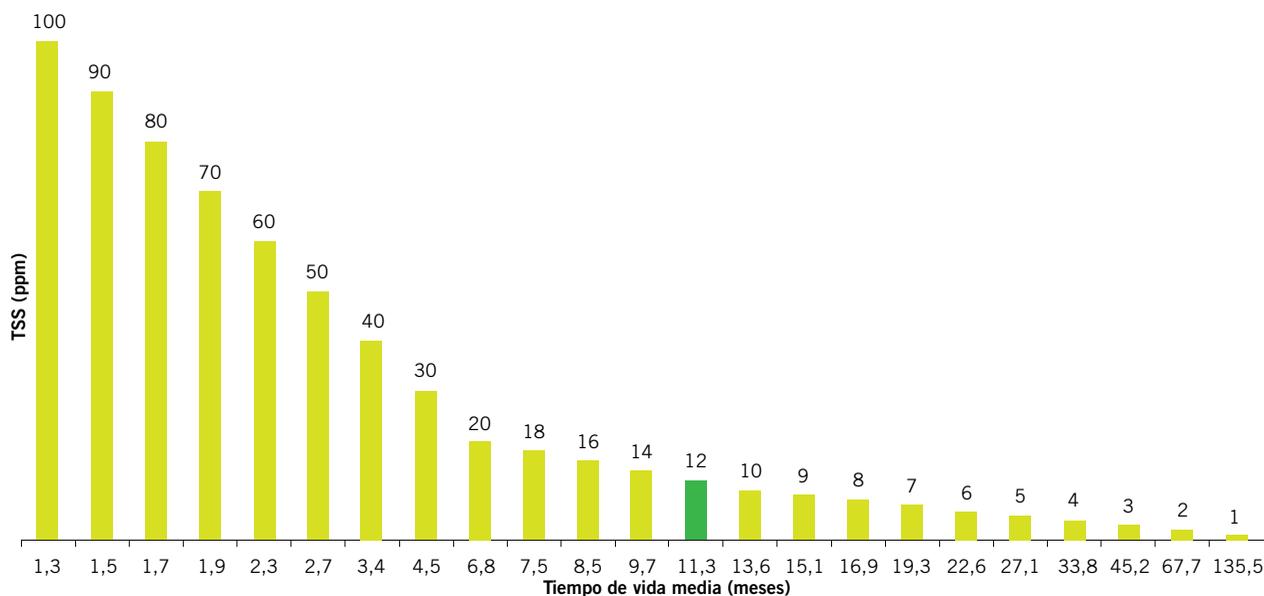


Figura 4. Tiempo de vida media en función de la concentración de sólidos en suspensión.

dominante. En nuestro caso equivale a partículas de tamaño mayor a 4 µm (un 91,03% de las partículas presentes). La profundidad de invasión de este tipo de daño se caracteriza por ser de algunos centímetros y de fácil remoción con tratamientos químicos.

- ✓ Daño interno: provocado por partículas de un tamaño comprendido entre 1/7 y 1/3 del tamaño de garganta poral dominante. En nuestro caso se corresponde a partículas cuyo tamaño está comprendido entre 1,7 µm y 4 µm (el 2,8% de las partículas). La profundidad de invasión de este tipo de daño se encuentra en el rango de 10 a 100 cm, es de difícil remoción con limpiezas y estas suelen ser muy costosas.

Con el fin de validar la metodología de cálculo teórico empleada, se realizaron en el laboratorio de UNCUIYO, ensayos de fluencia para predecir la reducción de permeabilidad producida por partículas inorgánicas y petróleo contenidas en el agua de inyección y así poder definir el mecanismo de daño de formación según el tipo de revoque formado. Se realizaron sobre tres muestras de diferentes permeabilidades 20,1 md, 50,62 md y 209,3 md, dando como resultado predominante la formación de revoque externo como predecía la regla teórica.

Conocido el tipo de daño, procedimos a estimar el Tiempo de Vida Media ($t_{1/2}$) para el pozo inyector, que se define como el tiempo que transcurre hasta que el caudal de inyección llega al 50% de su valor inicial. Se realizó un gráfico de sensibilidad del tiempo de vida media en función de la concentración de los sólidos en suspensión presente en el agua de inyección (Figura 4).

Se debe remarcar que la estimación del tiempo de vida media es muy sensible a la composición química de los sólidos disueltos (TSS) y al contenido de hidrocarburo presentes en el agua de inyección, ya que su característica aglutinante genera el aumento del tamaño de partículas en suspensión, modifica la densidad y la permeabilidad del revoque formado en la pared del reservorio.

La concentración de TSS en la salida de planta al momento de realizar el estudio, cercana a 90 ppm, permitió estimar 1,5 meses de tiempo de vida media, lo cual era consistente con el índice de taponamiento registrado a nivel campo a través de los perfiles de tránsito de fluidos y muestras de fondo. La meta del equipo de trabajo fue mejorar los parámetros de calidad de agua para lograr alcanzar un tiempo de vida media de 12 meses.

Una vez comprendida la problemática a nivel reservorio, se procedió con el análisis fisicoquímico del universo representativo de muestras de agentes taponantes. Los compuestos principales que se encontraron son hidrocarburo, insolubles y compuestos de hierro. Estos últimos fueron clasificados con ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopía Electrónica de Barrido (SEM). Las reflexiones más importantes de las fases cristalinas identificadas corresponden a óxidos, hidróxidos y sulfuros de hierro, así como también al dióxido de silicio.

En paralelo a los estudios mencionados, se determinó la configuración del sistema de aportes de fluidos a la Planta de Tratamiento (PTC-PTA), con la finalidad de realizar balances de materia por componente. Se destaca la utilización de volúmenes significativos de agua dulce proveniente de la planta de captación y tratamiento del Lago Mari Menuco, lo que se traduciría en una fuerte oxidación del

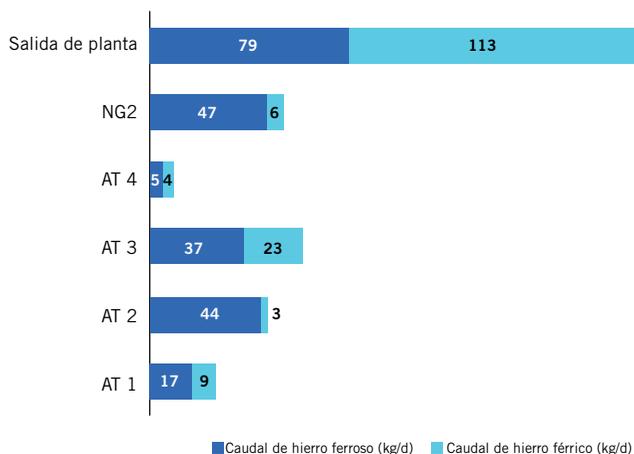


Figura 5. Caudal de hierro ferroso y férrico de baterías y salida de planta.

ión ferroso a férrico, compuesto taponante por excelencia.

Posteriormente, se avanzó con la determinación del origen de los compuestos de hierro y su estado de oxidación. Este aspecto tiene relación directa con el tamaño de partícula presente en el agua de inyección, ergo, del tipo de revoque insoluble y el daño de formación. Este fenómeno es generado, fundamentalmente, por óxidos y sulfuros de hierro. A tal efecto se realizaron numerosos muestreos a nivel batería y pozo discriminando entre hierro ferroso y férrico. El resultado de este análisis se resume en la figura 5, en la que se observa que el mayor proceso oxidativo ocurre en la batería AT-3 y en la planta de tratamiento. En lo que respecta a nivel pozo, los valores de Fe (total) se encontraron en el rango de 4,1 kg/d a 9,7 kg/d.

Desde entonces el equipo de trabajo puso foco en discernir los orígenes del hierro en el sistema. El mismo se puede dar por corrosión química, corrosión microbiológica, rozamiento en aparatos de bombeo, erosión por alta velocidad de fluido, aportes de formación y/o recirculación de ion ferroso en reservorio. Para identificar y cuantificar cada una de estas contribuciones, se desarrolló un plan de trabajo que incluyó el siguiente análisis:

- ✓ Análisis de laboratorio y simulación de la existencia de corrosión química en pozos productores con alto contenido de hierro total.
- ✓ Aplicar inhibidor de corrosión en forma de piloto en tres pozos con bombeo electro-sumergible, realizando monitoreo de hierro con análisis fisicoquímico.
- ✓ Determinar mediante análisis de laboratorio y simulación la existencia de corrosión microbiológica en pozos productores con antecedentes corrosivos.
- ✓ Seleccionar un pozo con antecedentes de rozamiento severo y reemplazar al bombeo mecánico actual por sistema electro-sumergible y bajar instalación revestida con pintura epoxi interna.

De la comparación de los resultados de laboratorio entre muestras "blanco" y posteriores con tratamiento de inhibidor, se comprueba que no hay cambios significativos en los valores de hierro, por lo tanto se descarta la hipótesis del aporte de hierro por corrosión química y/o microbiológica, con lo cual el estudio se centra en la problemática del rozamiento y la erosión del material por alta velocidad de fluido, que se encuentra en fase piloto.

Continuando con la comprensión del contenido de Fe en el sistema de recuperación secundaria, se observó un cambio del estado iónico del hierro entre la entrada y la salida de la planta, como se observa en la figura 6.

En el tanque de almacenamiento de agua de inyección, TK 2535, ocurre un gran proceso de oxidación variando de un 27% de ion férrico en la entrada a un 59% en la salida. Al analizar el diagrama de aportes de fluidos del proceso de tratamiento de agua, la corriente de agua dulce de la Planta de Captación (PIA) ingresa a este tanque para cumplir con el caudal de inyección del proyecto, esta corriente ingresa rica en oxígeno y reacciona con el ion ferroso para formar óxidos férricos.

Al analizar el oxígeno disuelto en agua y su evolución histórica se observó que rara vez había alcanzado los parámetros de especificación requerido para el reservorio y especificado en el plan de monitoreo del campo. Esto se debía a la deficiencia en el proceso de remoción de oxígeno del sistema en su conjunto.

Desde entonces el equipo conformó un plan de mejora que incluyó los siguientes puntos:

- ✓ Reacondicionar y puesta en marcha de la torre desoxigenadora de la PIA.
- ✓ Realizar ingeniería de obra y adicionar sistemas de gas de inertizado (gas de *blanketing*) en todos los tanques, tanto de la PIA como de la PTC-PTA,
- ✓ Aditivar secuestrante de oxígeno a la corriente de agua dulce que ingresa a la PTC-PTA.

Las acciones realizadas permitieron alcanzar los parámetros de especificación de oxígeno disuelto en agua y, consecuentemente, se minimizó la reacción de oxidación. En la figura 7 se muestra la tendencia de oxígeno (ppb) en la salida de planta (color verde) desde 2014 hasta la actualidad. Adicionalmente, se refleja la tendencia de la concentración (mg/l) de oxígeno en la corriente de salida de PIA (azul) y la concentración (ppm) de ion férrico en salida de planta (rojo). Los valores de oxígeno disuelto en agua en la salida de planta se ubican por debajo de las 50 ppb, la PIA mejoró su concentración de 6 ppm a 1 ppm y los valores de ion férrico se ubican en torno a los 2 mg/l evidenciando las mejoras en el proceso producto de las acciones aplicadas.

Otro de los parámetros principales por controlar, de acuerdo con la composición de los sólidos encontrados, es la concentración de hidrocarburos en agua producto de la propiedad aglutinante de partículas sólidas del mismo. En este sentido, el equipo de procesos de planta mejoró la performance de la unidad de flotación que, desde su puesta en marcha en julio de 2016 proporcionó estabilización de los valores de salida de planta y un marcado descenso de la concentración (ppm) de hidrocarburo en agua. En el marco de las acciones de mejora llevadas a cabo sobresalen modi-

ficaciones en los agitadores y barredores del equipo, como también el ajuste de la dosificación de anti-espumígeno y floculante. El resumen se refleja en el mejor rendimiento, lo cual permitió concentraciones de hidrocarburo en salida de planta en torno a las 10 ppm acercándonos a los valores de especificación como se muestra en la figura 8.

El control de la actividad microbiana desempeña un papel preponderante en la sustentabilidad de los proyectos de recuperación secundaria. Debido a ello, y siguiendo la iniciativa propuesta por el sector de integridad y tratamientos químicos, se reconfiguró la metodología de análisis bacteriológico y se conformó un plan piloto de inyección de biocida multipropósito.

La evolución de los valores de sulfuro, equivalente a la concentración de microorganismos observados en el sistema de inyección, desde el ingreso a la planta de tratamiento al pozo inyector, generó una alerta en el equipo de trabajo. Como se observa en la figura 9, los valores de sulfuro llegaron a triplicarse en el primer trimestre de 2016.

El nuevo biocida que se encuentra en fase de ensayo fue desarrollado en base al ADN de bacterias y busca reducir, no solo el contenido de bacterias reductoras de sulfato sino también al grupo denominado "arqueas" que cumple un papel muy similar a las BSR. Conjuntamente, con este tratamiento, se intentará eliminar bacterias tanto planctónicas como sésiles.

Cabe destacar que las mediciones tradicionales con caldos de cultivo dejaron de emplearse como método de recuento de colonias bacterianas, ya que sus resultados no son representativos. Esto se debe, en primer lugar, a que estudios recientes indicaron que el recuento de unidades formadoras de colonias mediante métodos tradicionales de medición posee un error significativo al no determinar fehacientemente la actividad de bacterias sésiles; en segundo lugar, la configuración química del caldo aplica a las bacterias del tipo sulfato reductoras, lo cual es inconsistente con la necesidad de este campo de determinar también al subgrupo de las arqueas. Es por esto que los análisis que se realizaron en los laboratorios se corresponden con las nuevas técnicas que son tendencia en el nivel mundial (el ADN de bacterias, el análisis qPCR y la medición de ATP). Con las dos primeras técnicas se pudo determinar el tipo de bacteria predominante, en tanto que con la medición de ATP se identificó cuantitativamente el universo microbiano, tanto vivo como muerto.

Finalmente, y con el objetivo de estabilizar y disminuir la concentración de sólidos en suspensión, se ensayará la separación en piletas re-acondionadas previo a la disposición final en el pozo sumidero. De esta manera se podrán derivar las corrientes de purga de la planta hacia el pozo en cuestión, minimizando el impacto de la recirculación de sólidos en la planta de tratamiento. Asimismo, se encuen-

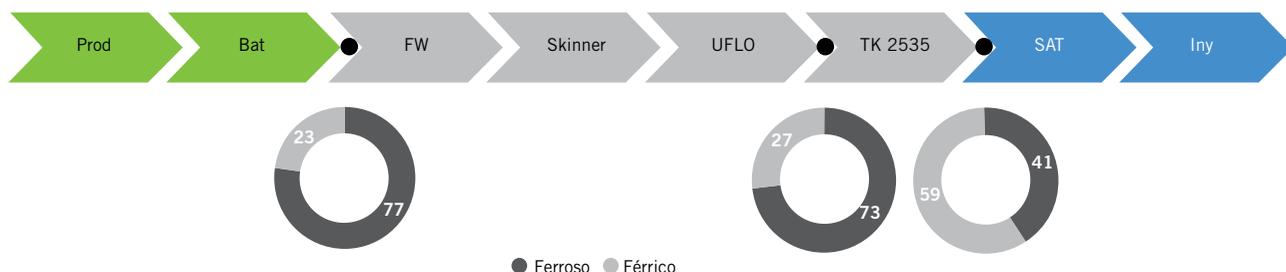


Figura 6. Evolución porcentual de ferroso y férrico en el proceso de tratamiento de agua.

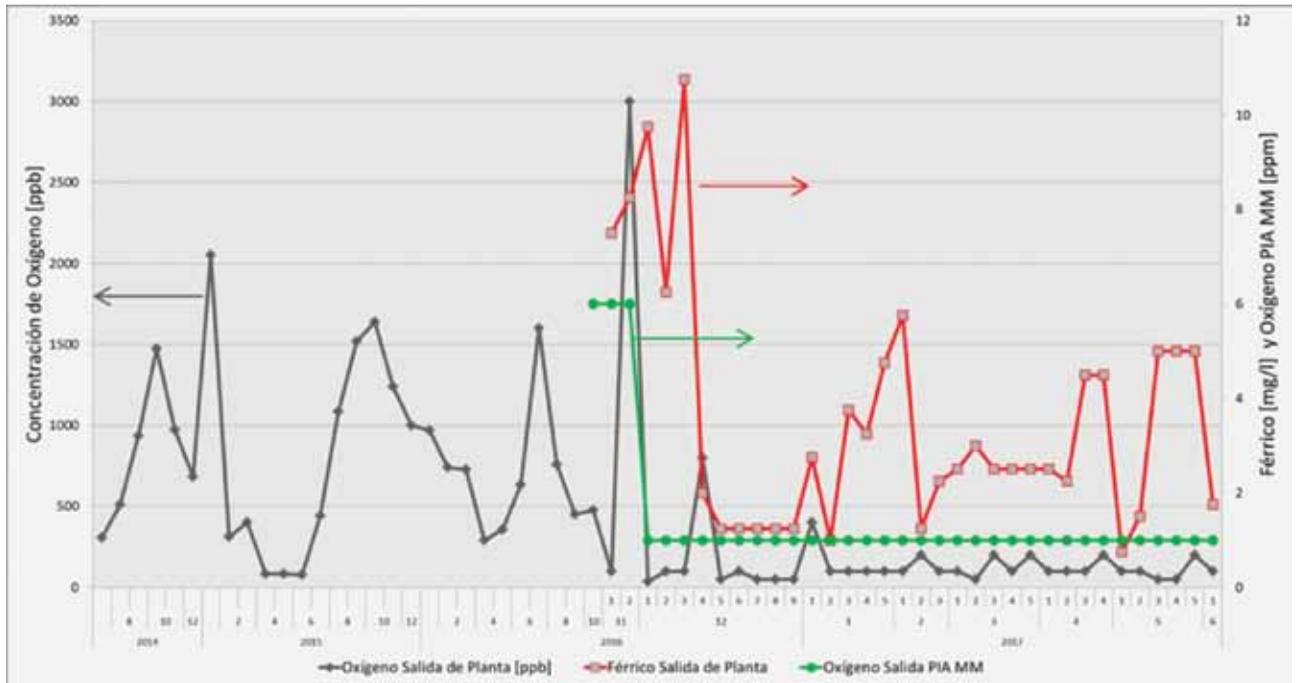


Figura 7. Tendencias de oxígeno en salida de PTA, oxígeno en salida de PIA y concentración de férrico.

tra en fase de ingeniería de obra el diseño de una planta de tratamiento de lodos como alternativa para enviar corrientes ricas en sólidos, con el fin de generar mejores parámetros del agua que reingrese a PTA y evitar fluctuaciones en el proceso de tratamiento.

Resultados

Este estudio permitió conformar un proceso de trabajo multidisciplinario con la sinergia de todos los sectores involucrados: ingeniería de reservorios, ingeniería de producción, ingeniería de procesos de planta, corrosión, tratamientos químicos y mantenimiento. A medida que se avanzaba con las acciones y en el entendimiento de la problemática en su conjunto, cambió la estructura funcional y de interrelación de los grupostécnicos y operativos del activo. Este proceso de gestión del talento ha generado, además de múltiples acciones a nivel de pozos e instalaciones, un cambio en la concepción de la gerencia de un yacimiento hacia la gestión integral de un activo, con beneficios en la comunicación, integración, mejora continua, identificación de lecciones aprendidas e implementación de mejores prácticas.

Como resultado principal se logró revertir la tendencia declinatoria de producción de petróleo y agua asociada, con baja demanda de inversiones al enfocar los esfuerzos en la causa raíz: la calidad de agua.

Como resultado del proceso de trabajo, también se pueden destacar los siguientes puntos:

- La confección de una matriz de parámetros que afecta la calidad de agua, estudio y ponderación de los mismos en pos de priorizar la solución de lo crítico.
- Identificar y cuantificar los valores de calidad de agua necesarios y específicos para el yacimiento.
- El estudio del sistema en su conjunto, evaluando cada una de las corrientes que lo afectan, permitió revelar que el agua de *flowback* no es el principal aporte de Fe.
- Cartera de oportunidades (PU, CTU) con menor riesgo y sustentable.
- Tareas con equipos de WL y SL más eficientes en calidad y cantidad. Mayor control a nivel campo con la misma cantidad de equipos al reducir tiempos y reincidencia.
- Estudiar y optimizar los tratamientos químicos en la planta de tratamiento de crudo y agua de inyección, específicamente el proceso de corrosión microbiana y el uso de biocida acorde al ADN de la masa bacteriana presente en el sistema. ■

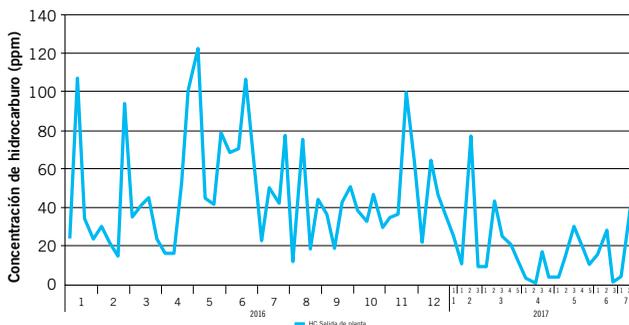


Figura 8. Tendencia de la concentración (ppm) de hidrocarburo en agua en salida de planta.

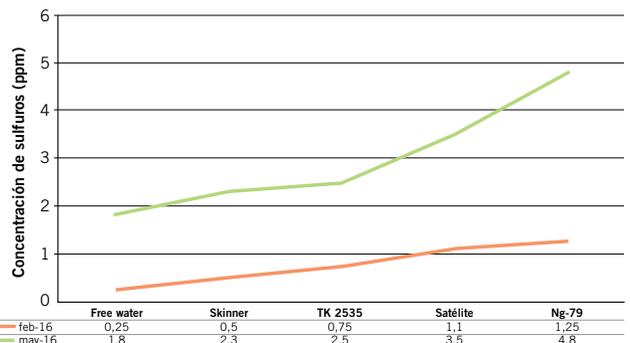


Figura 9. Concentración de sulfuro en el sistema de inyección.