



Reporte entregable 53

Caso de uso de aplicación de IA e IAGEN

Tratamiento y reciclaje del agua de fractura en Vaca Muerta

I. Introducción.

La técnica de fracturación hidráulica, esencial para la extracción de petróleo y gas de esquisto en la formación Vaca Muerta, demanda la utilización de vastas cantidades de agua, estimándose alrededor de 30 millones de litros por pozo. De este volumen inyectado a alta presión para fracturar la roca y liberar los hidrocarburos, entre un 20% y un 40% retorna a la superficie en forma de *flowback* o fluido de retorno.

Este fluido de retorno no sólo contiene el agua originalmente inyectada, sino también una compleja mezcla de sustancias arrastradas desde la formación geológica y los aditivos químicos empleados en el proceso de fracturamiento. Por su volumen y composición, la gestión del *flowback* representa un desafío significativo tanto desde una perspectiva ambiental como logística.

El auge de la actividad en Vaca Muerta ha provocado un incremento proporcional en la generación de aguas de retorno.

Esta situación subraya la importancia crítica de gestionar de manera adecuada el agua de *flowback* en Vaca Muerta. Una gestión eficiente permitiría disminuir la presión sobre los recursos hídricos en la región, minimizar los impactos ambientales adversos y cumplir con los estándares necesarios para la continuidad de las operaciones.

En este contexto, el tratamiento y reciclaje del fluido de retorno se ha convertido en una prioridad estratégica para las empresas operadoras, donde la incorporación de inteligencia artificial (IA), emerge como una solución prometedora. La magnitud del consumo de agua y el aumento constante en los volúmenes de *flowback* señalan una creciente presión sobre los recursos hídricos y la infraestructura de gestión de residuos, lo que convierte la adopción de tecnologías que mejoren la eficiencia, como la IA, en una necesidad para la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones en Vaca Muerta.

II. Desafíos en la gestión del fluido de retorno

El agua de retorno proveniente de la fracturación hidráulica presenta una composición química compleja y potencialmente contaminante. Al regresar a la superficie, el *flowback* arrastra consigo residuos de los aditivos químicos utilizados, como los geles fracturantes, así como elementos presentes en la roca reservorio, lo que resulta en un líquido con alta salinidad y una elevada carga de sólidos disueltos. Estudios y experiencias en la cuenca han detectado la presencia de compuestos peligrosos; los aditivos y sustancias retornados pueden ser tóxicos, inflamables e incluso carcinogénicos, y se ha alertado sobre posibles trazas de elementos radiactivos naturales y metales pesados en el *flowback*.

La presencia de sustancias carcinogénicas no solo implica riesgos directos para la salud, sino que también aumenta el escrutinio regulatorio y la preocupación pública en torno a la gestión del *flowback*, lo que podría afectar la licencia social para operar de las empresas en Vaca Muerta. Esta composición compleja clasifica al fluido de retorno como un residuo industrial de manejo delicado, normativamente catalogado como residuo especial o peligroso.

Los impactos ambientales potenciales son considerables si el *flowback* no se gestiona correctamente. Puede contaminar suelos y acuíferos subterráneos en caso de fugas o disposiciones inapropiadas, generando riesgos para la salud de las comunidades locales y afectando otras actividades económicas.

El almacenamiento temporal en piletas o tanques requiere la implementación de medidas de ingeniería específicas, como recubrimientos impermeables y sistemas de monitoreo, para prevenir derrames. La eliminación tradicional mediante pozos sumideros (inyección profunda) conlleva sus propios riesgos, incluyendo el aumento de la sismicidad inducida en zonas donde anteriormente no se registraban movimientos sísmicos perceptibles, y la posibilidad de migración de contaminantes en el subsuelo a largo plazo.

Por otra parte, el transporte en camiones desde los yacimientos hasta las plantas de tratamiento acarrea riesgos de accidentes y emisiones, además de costos elevados; tan sólo en un año se registraron 4800 viajes de camiones moviendo agua contaminada en Neuquén.

La carga logística y los riesgos asociados al transporte de grandes volúmenes de *flowback* resaltan el valor de las soluciones de tratamiento en el sitio o cerca de él, que pueden reducir la necesidad de un transporte extenso.

Gestionar el fluido de retorno en Vaca Muerta implica retos técnicos (por su composición contaminante), operativos (volúmenes crecientes, logística) y normativos, que demandan soluciones innovadoras.

III. Aplicación de IA en el tratamiento y reciclaje del fluido de retorno

Un esquema típico de tratamiento interno comienza con la separación de fases: equipos de desgasificación y separadores líquido-sólido eliminan hidrocarburos libres y partículas (arena, arcillas) del agua de retorno. Una separación de fases efectiva es un primer paso crucial, ya que reduce la carga en las etapas de tratamiento posteriores. Luego, procesos fisicoquímicos ajustan parámetros como el pH y precipitan metales; por ejemplo, la dosificación de coagulantes o estabilizantes ayuda a agrupar sólidos finos.

Sistemas de filtración y centrifugación retiran sólidos suspendidos remanentes, mientras que unidades especiales pueden remover compuestos orgánicos volátiles. Para reducir la alta salinidad, se aplican tecnologías de desalación como ósmosis

inversa o evaporadores mecánicos; estas requieren superar problemas de incrustaciones y fouling de membranas. Finalmente, el agua tratada se almacena para su reuso en nuevas fracturas, y los concentrados de rechazo (salmuera, lodos) se gestionan como residuos.

La incorporación de modelos de IA en estos procesos podría elevar significativamente la eficiencia y capacidad de control. Técnicas de aprendizaje automático pueden predecir la calidad del flowback entrante en tiempo real, basándose en datos de sensores (pH, conductividad, turbidez, contenido de hidrocarburos) y en parámetros de operación del pozo. De esta manera, es posible anticipar, por ejemplo, un pico de salinidad o la presencia de cierto metal pesado, y ajustar proactivamente la dosificación de químicos o la configuración de membranas. Modelos de redes neuronales artificiales (ANN) ya han mostrado éxito en optimizar procesos complejos de tratamiento de agua, aprendiendo de datos históricos para mejorar continuamente el desempeño.

También se pueden entrenar algoritmos para optimizar la secuencia de tratamiento: decidir la tasa de flujo óptima a través de cada módulo, cuándo regenerar o limpiar filtros, o qué mezcla de coagulantes logra remover contaminantes al menor costo. Un ejemplo aplicado es el uso de redes *feedforward* con control predictivo que, según estudios, podría reducir significativamente los costos de desalación y potabilización del agua producida, haciendo que la opción de reciclar sea no solo ambientalmente atractiva sino también la más económica para la empresa.

Otra área clave es el monitoreo en tiempo real y la detección de eventos mediante IA. Los sistemas SCADA tradicionales ya recopilan datos de sensores en las operaciones, pero la IA permite ir más allá de alarmas fijas: algoritmos de visión computarizada y análisis multivariable pueden detectar patrones sutiles que indiquen un problema incipiente en la planta de tratamiento. Por ejemplo, mediante cámaras e IA se podría identificar cambios en la turbidez o color del agua que anticipen una sobrecarga de sólidos, activando ajustes antes de que se infrinja un límite de calidad. De igual modo, la IA puede reconocer condiciones de riesgo como

un tanque acercándose a su capacidad máxima y ejecutar acciones automáticas (cerrar válvulas, desviar flujos) para evitar derrames.

Estos “operadores virtuales” trabajan 24/7 complementando la supervisión humana, y han demostrado reducir errores y tiempos de respuesta en operaciones petroleras digitales.

En definitiva, la IA puede transformar el tratamiento del agua al optimizar procesos como la dosificación de productos químicos y el control de calidad. Puede mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales mediante la automatización de procesos y la predicción de problemas. También puede ayudar a detectar patógenos en el agua y optimizar la recuperación de recursos y puede analizar grandes conjuntos de datos para comprender y predecir cómo funcionan las plantas de tratamiento y tomar mejores decisiones en tiempo real. Se ha demostrado que la aplicación de esta tecnología puede ahorrar entre un 20 y un 30% en gastos operativos y, asimismo, disminuir los costos de materia prima.

La amplia gama de aplicaciones exitosas de la IA en el tratamiento general de aguas industriales indica un potencial significativo para beneficios similares en el contexto específico de la gestión del agua de *flowback* en la industria del petróleo y el gas.

Hoy en día, la IA Generativa también ofrece grandes oportunidades de optimización en la actividad. La Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) es una rama de la inteligencia artificial que se centra en la creación de nuevo contenido, como modelos, imágenes, código o texto, a partir de datos existentes ⁷. Esta tecnología utiliza algoritmos avanzados para analizar grandes cantidades de información, identificar patrones y generar contenido nuevo y original que a menudo es indistinguible del creado por humanos.

IV. Agentes de IA y workflows agénticos. La evolución de la IA generativa.

1. Concepto de agentes de IAGEN

En los últimos años, la inteligencia artificial generativa (IAGen) ha revolucionado la manera en que interactuamos con la tecnología, permitiendo el desarrollo de sistemas capaces de generar contenido, responder preguntas complejas y asistir en

tareas cognitivas de alta demanda.

La Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) es una rama de la inteligencia artificial que se centra en la creación de nuevo contenido, como modelos, imágenes, código o texto, a partir de datos existentes. Esta tecnología utiliza algoritmos avanzados para analizar grandes cantidades de información, identificar patrones y generar contenido nuevo y original que a menudo es indistinguible del creado por humanos.

A partir de esta capacidad, surge una nueva arquitectura tecnológica: los agentes impulsados por IAGen. Estos agentes no son simples interfaces conversacionales, sino sistemas autónomos que pueden interpretar instrucciones, tomar decisiones, ejecutar tareas y aprender de sus interacciones con el entorno.

Un agente de IAGen combina grandes modelos de lenguaje con componentes adicionales como herramientas externas, memoria, planificación y ejecución autónoma. Esto les permite operar en entornos complejos, con capacidad para descomponer objetivos en pasos, coordinar múltiples acciones, interactuar con sistemas digitales (como bases de datos, APIs o documentos) y adaptarse a los cambios del contexto en tiempo real. Estas cualidades los distinguen de los chatbots tradicionales, y abren un espectro de aplicaciones más sofisticadas y personalizables.

En el ámbito organizacional, estos agentes se están utilizando para automatizar procesos, generar análisis de datos, asistir en la toma de decisiones y mejorar la experiencia del usuario, tanto interna como externamente. Por ejemplo, pueden asumir tareas de recursos humanos, legales, financieras o logísticas, e incluso, vinculadas a las áreas técnicas de procesos productivos, actuando como asistentes inteligentes que colaboran con equipos humanos. Esta capacidad de integrar conocimientos y ejecutar tareas de forma autónoma transforma la forma en que las organizaciones pueden escalar sus operaciones sin perder calidad ni control.

Además, los workflows agénticos —estructuras donde múltiples agentes colaboran entre sí para resolver problemas complejos— permiten distribuir responsabilidades entre distintos perfiles de agentes, cada uno con funciones específicas. Esto genera

entornos de trabajo híbridos donde humanos y agentes coexisten, optimizando tiempos, costos y resultados. La posibilidad de conectar agentes con herramientas como Google Drive, CRMs o plataformas de gestión documental amplía aún más sus capacidades.

El desarrollo de agentes impulsados por IAGen representa un paso crucial hacia una nueva era de automatización inteligente.

Entre los beneficios de los workflows auténticos impulsados por modelos de inteligencia artificial generativa, se encuentra la posibilidad de automatizar procesos productivos completos, de punta a punta, e incluso, agregar valor a partir del aprovechamiento de las habilidades de los modelos de lenguaje basados en dichas tecnologías.

Sin embargo, su implementación también plantea desafíos técnicos, éticos y jurídicos, desde el diseño responsable hasta la supervisión humana. Por eso, comprender su arquitectura, su lógica operativa y sus impactos potenciales es fundamental para su adopción efectiva y segura en diversos contextos profesionales.

2. Propuesta de diseño de agente impulsado por IAGEN aplicable a la actividad

a. Objetivo del workflow

Maximizar el reúso del agua de fractura, minimizando riesgos, costos y residuos, mediante el despliegue de agentes inteligentes conectados a sensores, sistemas SCADA, bases de datos y herramientas de análisis.

b. Flujo de trabajo

Agente de Integración y Preprocesamiento de Datos

Rol: Recolecta y normaliza datos de múltiples fuentes (sensores IoT, SCADA, laboratorio, meteorología, historial del pozo).

Herramientas conectadas: APIs SCADA, bases SQL, nubes de datos, hojas de

cálculo.

Funciones:

- Detecta errores y lagunas de datos.
- Estandariza formatos.
- Informa al Agente Predictivo.

Agente Predictivo de Calidad del Flowback

Rol: Predice composición y riesgos del agua de retorno en tiempo real.

Modelos utilizados: redes neuronales, regresiones multivariadas.

Entradas: variables como pH, salinidad, turbidez, metales pesados.

Acciones:

- Estima necesidades de tratamiento.
- Informa al Agente de Control del Proceso.

Agente de Control y Optimización del Tratamiento

Rol: Ajusta parámetros operativos en tiempo real para optimizar tratamiento.

Conexiones: actuadores, válvulas, bombas, dosificadores químicos.

Tareas:

- Decide dosis óptimas de coagulantes.
- Ajusta secuencia de tratamiento (filtrado, desalación, etc.).
- Coordina limpiezas y mantenimientos predictivos.

Agente de Visión Artificial y Seguridad

Rol: Detecta anomalías visuales y activa respuestas automáticas.

Tecnología: cámaras con IA, algoritmos de detección multispectral.

Funciones:

- Alerta por turbidez anormal.
- Detecta niveles de tanque peligrosos.
- Ejecuta acciones autónomas (cierra válvulas, notifica fallos).

- **Beneficios directos y comparación con métodos tradicionales**

El enfoque de tratamiento y reciclaje asistido por IA ofrece beneficios tangibles sobre los métodos tradicionales de manejo de flowback.

En términos de *eficiencia y costos*, la optimización inteligente de los procesos puede reducir el costo por metro cúbico de agua tratada, volviendo el reciclaje más rentable que la eliminación convencional. Al ajustar dinámicamente la dosificación de reactivos químicos según la calidad real del agua, se evita el uso excesivo de insumos, generando ahorros económicos y menos subproductos (lodos, sales). Asimismo, maximizar la recuperación de agua reutilizable implica que la operadora necesita comprar o extraer menos agua dulce para futuras fracturas, con el consiguiente ahorro.

Un estudio sugiere que al implementar control predictivo con IA en plantas de tratamiento, el gasto operativo disminuye al punto de que la reutilización deja de ser solo una medida ecológica para convertirse en la opción económicamente óptima. Esto contrasta con métodos tradicionales donde a menudo se desecha la mayor parte del flowback en pozos de inyección, incurriendo en costos de transporte y pago a terceros, además del desperdicio del recurso hídrico.

En cuanto a los *tiempos operativos*, la IA permite acelerar la toma de decisiones y la respuesta a condiciones cambiantes. En un esquema tradicional, las muestras de agua de retorno podrían enviarse al laboratorio y días después ajustar el tratamiento; con modelos de IA, el sistema adapta parámetros en tiempo real, evitando retrasos en las operaciones de fractura subsecuentes. Esto significa que el tiempo de acondicionamiento del agua para reuso se minimiza, reduciendo potencialmente el ciclo entre fracturas en un pad de pozos. Además, la automatización inteligente disminuye paradas imprevistas: por ejemplo, algoritmos de *mantenimiento predictivo* anticipan fallas en bombas o filtros (analizando vibraciones, presiones, caudales) y programan mantenimientos en momentos oportunos. Así se evitarían interrupciones sorpresivas que en métodos convencionales podrían detener el tratamiento y encarecer las operaciones.

La seguridad operativa y la reducción del impacto ambiental son otras dos áreas fortalecidas. Un sistema optimizado con IA requiere menos intervención manual continua, lo que implica menos personal expuesto directamente a aguas contaminadas o a riesgos en planta. Mientras que antes era necesario tener operadores vigilando tanques y válvulas para prevenir incidentes, hoy buena parte de esa supervisión la realizan sensores inteligentes; los técnicos pueden monitorear remotamente y sólo intervenir cuando el sistema lo solicita. Esto reduce el riesgo de accidentes laborales y exposición a químicos peligrosos. Desde el punto de vista ambiental, el principal beneficio es que se logra reutilizar una fracción mucho mayor del agua de retorno en vez de descartarla.

En experiencias recientes, tasas de reuso cercanas al 80% del flowback significaron cientos de metros cúbicos de agua que no fueron vertidos ni inyectados, sino reincorporados al ciclo productivo. Esto no solo preserva fuentes de agua natural (al disminuir la extracción de ríos o acuíferos), sino que también reduce la huella ambiental de la operación al generar menos residuos líquidos finales. Comparado con métodos tradicionales de disposición (p. ej. evaporación en piletas o simple dilución), un proceso optimizado minimiza las emisiones difusas, controla mejor los efluentes y garantiza un cumplimiento más holgado de los límites regulatorios de calidad.

En síntesis, a diferencia de un manejo convencional del flowback –caracterizado por ser reactivo, intensivo en recursos y centrado en la disposición final–, el manejo inteligente con IA es *proactivo*, eficiente y enfocado en la economía circular del agua.

Mientras los métodos tradicionales veían al flowback principalmente como un desecho a eliminar, las prácticas modernas lo tratan como un recurso: la IA facilita extraer valor (agua reutilizable, incluso subproductos aprovechables) donde antes solo había un pasivo ambiental. Esto se traduce en diferencias clave: (1) *Monitoreo continuo vs. intermitente*: sensores IoT e IA vigilan la calidad del agua segundo a segundo, frente a muestreos esporádicos manuales en métodos clásicos. (2) *Control adaptativo vs. fijo*: los algoritmos ajustan bombas, válvulas y dosificación en forma dinámica según las condiciones, mientras que en plantas tradicionales los setpoints son estáticos y requieren intervención humana para cambiar. (3) *Optimización integral vs. segmentada*: la IA puede optimizar todo el sistema de gestión de agua (tratamiento, almacenaje, reinyección) como un conjunto, algo impracticable manualmente cuando hay decenas de variables; por ejemplo, puede balancear en tiempo real cuánta agua reciclar en sitio y cuánta derivar a disposición externa para no sobrecargar ninguna unidad. (4) *Trazabilidad y cumplimiento*: un sistema digital registra cada litro tratado, mezclado o dispuesto, facilitando reportes automáticos a las autoridades, a diferencia del papeleo tradicional propenso a errores.

Gracias a estas diferencias, las operaciones que adoptan IA logran mayor confiabilidad en la gestión del flowback, evitando sorpresas y optimizando resultados en comparación con la metodología convencional.

V. Desafíos y estrategias de implementación

A pesar de los beneficios, la adopción de IA en el tratamiento de agua de fractura conlleva desafíos que requieren estrategias claras para su implementación efectiva en Vaca Muerta.

Desde el punto de vista técnico, uno de los principales obstáculos es la disponibilidad y calidad de datos. Los modelos de IA son tan buenos como los datos

con que se entrenan; en yacimientos no convencionales, la composición del flowback puede variar significativamente de un pozo a otro y en el tiempo, lo que exige recopilar gran cantidad de datos representativos. Esto implica instalar sensores en campo (para variables físico-químicas, caudales, etc.) y garantizar su calibración y mantenimiento. Integrar estos nuevos flujos de datos con los sistemas existentes (SCADA, historiales de laboratorio) puede requerir actualizaciones de infraestructura de TI y protocolos de comunicación seguros en locaciones remotas.

Asimismo, el desarrollo de modelos predictivos confiables demanda conocimiento experto integrado: no basta con aplicar un algoritmo genérico, es necesario incorporar al modelo las reglas químicas y operativas propias del tratamiento de flowback. Esta integración de conocimiento ingenieril con IA es desafiante y suele requerir un enfoque multidisciplinario, combinando data scientists con ingenieros de proceso y especialistas en aguas.

Se recomienda realizar una Inversión de corto plazo en equipos de implementación de agentes de IA en tecnología y capacitación. Se requiere inversión en pruebas de concepto y pruebas piloto. El foco aquí tiene que ser la formación del talento para implementar, ya que se verifica una tendencia de reducción de costos en sistemas que permiten automatización “no code” y “low code”. Para la primera etapa, también se recomienda recurrir a equipos con experiencia en diseño e implementación de agentes de IA. Por último, es clave formar un equipo “in house” para el acompañamiento y la apropiación de una cultura agéntica que redefine la interacción humano-máquina.

Existen también barreras regulatorias y culturales en la adopción de estas tecnologías. Las normas ambientales, si bien estrictas en cuanto a resultados (calidad del efluente, trazabilidad), no siempre contemplan explícitamente el uso de sistemas basados en IA. Esto puede generar incertidumbre sobre cómo aceptarán las autoridades un proceso automatizado: por ejemplo, asegurar que un algoritmo autónomo de control cumplirá sin falta los límites de vertido.

Las empresas deben trabajar de la mano con los reguladores, demostrando transparencia en el funcionamiento de sus sistemas inteligentes (auditorías de los algoritmos, redundancia de medidas de seguridad) para ganar confianza.

A nivel organizacional, puede haber resistencia al cambio por parte de operarios y mandos medios acostumbrados a métodos tradicionales. La introducción de IA suele requerir capacitación del personal para interpretar las recomendaciones de los modelos y para gestionar excepciones cuando sea necesario intervenir manualmente. Superar esta brecha cultural implica mostrar tempranamente *resultados positivos* (por ejemplo, una reducción notable de costos o incidentes) que ayuden a alinear a todo el equipo con la nueva forma de trabajo.

Económicamente, el desafío radica en el capital inicial y la justificación de la inversión. Implementar IA en el tratamiento de aguas conlleva gastos en sensores adicionales, plataformas de software, desarrollo de modelos a medida y posiblemente infraestructura de comunicación en campo (redes para transmisión de datos). Para algunas operadoras, sobre todo las medianas o nuevas en Vaca Muerta, puede ser difícil asignar presupuesto a algo que perciben como experimental. Aquí es crucial plantear una estrategia gradual: iniciar con proyectos piloto de bajo riesgo que permitan calcular el retorno de inversión. Por ejemplo, se podría equipar con IA una sola planta de tratamiento en sitio o un módulo específico (como el control de membranas) y medir durante varios meses la mejora en eficiencia.

Si el piloto evidencia, digamos, un ahorro del 15% en costos de químicos y un 10% más de agua reutilizada, esos datos ayudan a convencer a la dirección de escalar la solución. Adicionalmente, existen vías para mitigar costos: colaborar con instituciones de investigación o startups tecnológicas que busquen validar sus algoritmos en entornos reales, o aprovechar incentivos gubernamentales.

Para enfrentar las barreras técnicas, una estrategia efectiva es conformar el equipo adecuado con las habilidades pertinentes. Esto implica contar con expertos en IA (científicos de datos, desarrolladores) que trabajen codo a codo con los ingenieros de procesos hídricos de la empresa. Juntos deben definir claramente los *casos de uso* más valiosos a abordar con IA –por ejemplo, optimizar la reutilización en

fracturas consecutivas, o minimizar sólidos en el agua para proteger bombas– de forma tal que las soluciones se enfoquen en objetivos de negocio concretos y medibles.

Otro aspecto clave es planificar la implementación en fases: primero digitalizar y automatizar la operación actual (si una planta aún requiere muchas acciones manuales, dotarla de sensores y controles básicos), luego introducir analíticas descriptivas (dashboards de desempeño), más tarde analíticas predictivas (modelos que aconsejen acciones) y finalmente analíticas prescriptivas con IA autónoma. Una hoja de ruta escalonada puede facilitar la absorción del cambio y permite aprender en cada etapa.

Durante el despliegue de IA, es recomendable mantener *redundancias* y planes de contingencia: por ejemplo, si el sistema automatizado fallara, asegurar que existe un modo de operación manual que garantice la continuidad sin incidentes. Esto aborda las preocupaciones de confiabilidad mientras la tecnología madura.

Las estrategias de integración también pasan por compartir conocimiento y estandarizar buenas prácticas. Dado que varias operadoras enfrentan el mismo desafío del agua de retorno, iniciativas colaborativas (como consorcios de la industria o espacios piloto en conjunto con entes reguladores) pueden acelerar la curva de aprendizaje.

Imaginar un *proyecto demostrativo* en Vaca Muerta donde múltiples compañías y el gobierno provincial prueben distintas soluciones de IA para tratamiento de flowback, difundiendo resultados, podría generar confianza y reducir la percepción de riesgo.

En resumen, los obstáculos para adoptar IA –sean técnicos, regulatorios o económicos– pueden superarse con planificación y pilotajes cuidadosos, con soluciones a medida de la realidad local. La clave está en alinear la innovación con los objetivos de negocio y las políticas ambientales: así, la IA no se verá como una caja negra impuesta, sino como una herramienta habilitadora para una gestión más segura, limpia y eficiente del agua en los reservorios no convencionales de Vaca Muerta.

VI. Conclusión y recomendaciones

La gestión del fluido de retorno en Vaca Muerta representa un punto crítico donde convergen las dimensiones ambiental, operativa y económica de la industria petrolera no convencional. Este informe destaca cómo el tratamiento y reciclaje del agua de fractura, apoyado por herramientas de inteligencia artificial, puede transformar un problema –los millones de litros de flowback contaminado– en una oportunidad de mejora continua.

Los hallazgos clave señalan que es técnicamente factible y beneficioso reutilizar gran parte del agua de retorno tras un acondicionamiento adecuado, y que la IA puede impulsar dicha reutilización a niveles superiores de eficiencia, reduciendo costos y riesgos simultáneamente. En contraste con los métodos tradicionales de “usar y desechar”, la optimización inteligente promueve un modelo circular donde el agua se mantiene dentro del ciclo productivo el mayor tiempo posible, disminuyendo la huella hídrica del shale y la generación de residuos.

De cara al futuro, se recomiendan próximos pasos concretos para capitalizar estas oportunidades en Vaca Muerta. Primero, las empresas operadoras deberían identificar pilotos específicos para la aplicación de IA en el tratamiento de flowback, idealmente en colaboración con proveedores tecnológicos y con el acompañamiento regulatorio desde el inicio. Estos proyectos piloto servirán para adaptar las soluciones a las particularidades locales (geología, química del agua, infraestructura disponible) y generar datos locales que refinan los modelos.

Segundo, es aconsejable que el sector público y las instituciones de investigación locales apoyen activamente estos esfuerzos, ya sea facilitando la experimentación controlada (permisos temporarios, flexibilidad normativa para pilotos) o mediante incentivos que aceleren la inversión privada en tecnologías limpias.

Tercero, la industria en su conjunto debe fomentar la capacitación y el intercambio de mejores prácticas en torno a la digitalización e inteligencia artificial. Programas de entrenamiento para ingenieros y operadores en herramientas de análisis de

datos, así como talleres inter-empresa para discutir resultados de distintas estrategias de reutilización, contribuirán a acelerar la curva de adopción.

En conclusión, Vaca Muerta tiene la oportunidad de ser un referente en gestión sustentable del agua en desarrollos no convencionales. La combinación de políticas ambientales adecuadas, avances en IA y compromiso empresarial puede derivar en un modelo donde cada barril de petróleo producido implique menos litros de agua extraídos y menos residuos generados. Aprovechar la IA para optimizar el ciclo del flowback no solo ayudará a cumplir con las regulaciones vigentes en Neuquén, sino que preparará al sector para estándares ambientales más exigentes y potenciará su reputación pública.

Las recomendaciones aquí expuestas invitan a los empresarios del sector a adoptar una visión proactiva: invertir en innovación hoy para asegurar la competitividad y sostenibilidad de sus operaciones mañana.

Con pasos firmes en esta dirección, la industria del shale oil & gas en Argentina podrá continuar su crecimiento minimizando su impacto hídrico y ambiental, demostrando que desarrollo energético y cuidado del agua pueden –y deben– ir de la mano.

Fuentes citadas:

1. Efectos, impactos y riesgos socioambientales del megaproyecto Vaca Muerta acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en:[Efectos, impactos y riesgos socioambientales del megaproyecto Vaca Muerta*](#)
2. La gestión del agua de flowback de Vaca Muerta acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en:[La gestión del agua de flowback de Vaca Muerta](#)
3. Boom Vaca Muerta: Las plantas de tratamiento están al límite acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en: [Boom Vaca Muerta: Las plantas de tratamiento están al límite](#)
4. Vaca Muerta y la contaminación ambiental - Cambio acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en:[Vaca Muerta y la contaminación ambiental - Cambio](#)

5. Sismos, agua y fracking: ¿Debería Vaca Muerta aprender de Texas? acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en: [Sismos, agua y fracking: ¿Debería Vaca Muerta aprender de Texas?](#)
6. Con el salto de la producción, los residuos de Vaca Muerta aumentaron un 35,2% | Mejor Energía acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en: [Con el salto de la producción, los residuos de Vaca Muerta aumentaron un 35,2% | Mejor Energía](#)
7. La gestión del agua de flowback de Vaca Muerta acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en: [La gestión del agua de flowback de Vaca Muerta](#)
8. Vaca Muerta: Revelan positivos resultados de recuperación de agua de flowback acceso: 3 de abril de 2025. Disponible en: [Vaca Muerta: Revelan positivos resultados de recuperación de agua de flowback](#)
9. AI/ML Technology for Water Treatment in Oil and Gas Industry acceso: 4 de abril de 2025. Disponible en: [AI/ML Technology for Water Treatment in Oil and Gas Industry: A Review Paper\[v1\] | Preprints.org](#)
10. Oil and Gas Digital Solutions: Autonomous Water Treatment Systems Still Need Humans acceso: 4 de abril de 2025. Disponible en: [Oil and Gas Digital Solutions: Autonomous Water Treatment Systems Still Need Humans](#)
11. 5 Aplicaciones de la IA en el Monitoreo de Calidad Del Agua acceso: 4 de abril de 2025. Disponible en: [5 Aplicaciones de la IA en el Monitoreo de Calidad Del Agua | Blog](#)
12. Usos de la IA en la industria del agua acceso: 4 de abril de 2025. Disponible en: [Usos de la IA en la industria del agua | Seven Seas Water Group](#)