

ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA DE FRACTURA PARA DESARROLLOS NO CONVENCIONALES A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA.

Franco Gastón Espinaco - Nonlinear Tecnología - *fespinaco@nonlinear.com.ar*

Agustín Francisco Montagna - Nonlinear Tecnología - *agumontagna@nonlinear.com.ar*

Sinopsis

El objetivo del trabajo es desarrollar una solución estratégica para la gestión integral del abastecimiento de agua de fractura para múltiples desarrollos en simultáneo dentro de un plan de explotación no convencional. La complejidad del problema radica en la existencia de diversos nodos de aprovisionamiento con caudal limitado, la posibilidad de reutilizar agua de producción, la instalación de plantas de tratamiento, la coordinación de la oferta y la demanda, la combinación óptima de los medios de transporte, así como la configuración de una red de suministro que minimice las inversiones y costos de operación.

La fractura de un pozo no convencional requiere más de 50.000 m³ de agua, lo cual, considerando un pad de 6 pozos, redundaría en un requerimiento total de 300.000 m³ por locación. Este insumo es clave para la fractura de la roca madre y la puesta en producción, por lo que asegurar su aprovisionamiento es crítico.

Un punto clave es que al liberar la producción es posible recuperar aproximadamente el 60% como agua de producción. Este caudal tiene grandes contenidos de sólidos disueltos por lo que no es posible disponerla sin un tratamiento previo. Para ello, existen tres grandes alternativas para gestionar este subproducto: (1) tercerizar su recolección y tratamiento, (2) tratarlo en instalaciones propias, o (3) re-inyectarla para la fractura de nuevos pozos. Independientemente de la combinación de alternativas, se debe gestionar el agua desde el pozo hacia las distintas alternativas.

En cuanto a los medios de transporte para el agua de producción, existen principalmente dos medios: ductos y camiones. Los primeros se destacan por el alto nivel de inversión necesario y el bajo costo de operación, esto contrasta con el transporte a través de camiones que requiere una menor inversión, mayores costos operativos, pero ofrece una mayor flexibilidad respecto a los ductos.

A través de un modelo matemático mixto entero-lineal se pretende optimizar el diseño y operación de la red de agua de fractura minimizando el valor presente neto de las inversiones y costos operativos para un determinado plan de producción. La herramienta decide de forma óptima sobre: (1) ubicación y período de instalación de plantas de tratamiento, (2) topología de la red de ductos de agua entre los distintos nodos, (3) flota requerida para cada período, (4) flujos de agua entre los distintos nodos sincronizando la oferta y la demanda, (5) nivel de costos operativos e inversiones por período.

Introducción

Durante la última década el sector del *Oil & Gas* en Argentina se ha caracterizado por un crecimiento en las actividades no convencionales impulsado por el desarrollo del yacimiento de Vaca Muerta. Actualmente Argentina es el 2do país con mayor producción de petróleo a través de fuentes no convencionales [1] y el 5to en términos de reservas. Un fenómeno similar puede observarse con el gas no convencional, donde Argentina se posiciona en el tercer puesto en ambos casos [2]. Actualmente la producción diaria en barriles de petróleo para el yacimiento asciende a aproximadamente trescientos mil barriles diarios y las proyecciones apuntan a triplicar esta cifra para el año 2030. Alcanzar este objetivo dependerá, no solo de la disponibilidad de recursos claves como los rigs de fractura o sets de fractura, sino de la coordinación de las actividades logísticas tanto *inbound* como *outbound*.

La extracción de recursos no convencionales es frecuentemente descrita a través de 4 operaciones bien diferenciadas: *top setting*, *horizontal drilling*, *hydraulic fracturing* y *turning in line* [3]. La primera de las actividades consiste en la perforación vertical del pozo y en la colocación del *casing* para aislar la actividad. Luego, se realiza la perforación horizontal (lo cual es una de las grandes distinciones entre las actividades convencionales y no convencionales) la cual puede extender por más de 4000 metros. En tercer lugar, se lleva a cabo la fractura propiamente dicha la cual requiere de dos grandes insumos: agua y un agente propanante (usualmente arena). Por último, se conecta el pozo a la red para poder extraer los recursos.

Respecto al agua necesaria, si bien depende de cada pozo y el plan de fractura, se requieren aproximadamente entre 50000 y 90000 metros cúbicos de agua por pozo. Si se consideran *pads* de 6 pozos la cifra asciende a más de 300000 metros cúbicos en total. Actualmente en Vaca Muerta casi la totalidad del agua utilizada para la fractura es agua “fresca”, i.e, es agua que se extrae de un curso de agua natural como un río o un lago. El uso de agua fresca para la explotación de recursos no convencionales puede traer cuestionamientos respecto a la sustentabilidad de dicha práctica. En este sentido en los últimos años se han publicado muchos trabajos relativos a estrategias para disminuir la cantidad de agua fresca utilizada y sustituirla con otras fuentes o introducir estrategias de tratamiento y reutilización.

Para completar el panorama es necesario hablar de dos fenómenos que están íntimamente ligados al agua para la fractura. Estos son: el agua de producción y el *flowback*. En los yacimientos no convencionales lo que se encuentra en la roca madre es usualmente una mezcla de tres fluidos: petróleo, gas y agua. Al estimular el reservorio con la fractura se termina extrayendo una mezcla (caracterizada por su correspondiente GOR y WOR) que luego es separada. Es decir, que cuando un pozo entra en producción empieza a generar agua, por lo general con un alto contenido de sales, que debe tratarse y reutilizarse o llevarse a disposición final (para lo cual se suele utilizar un pozo sumidero). Por otro lado, de toda el agua que se utiliza para la fractura hidráulica aproximadamente un 40% vuelve en forma de *flowback* algunas semanas después de realizada la fractura. Con esta fuente de agua sucede el mismo dilema, o bien se trata y se reutiliza, o se envía a disposición final.

En Argentina, en particular en Vaca Muerta, actualmente más del 90% del agua recuperada (agua de producción y *flowback*) es llevada a disposición final y no se reutiliza. La reutilización del agua recuperada no sólo es una oportunidad para volver la práctica más sustentable, sino que tiene el potencial de generar ahorros y esquemas virtuosos, sobre todo en un contexto en dónde se proyecta triplicar la actividad en la zona. También es importante destacar que, ante la posibilidad de que el marco legal se vuelva más restrictivo respecto al uso de agua dulce, es importante contar con planes de contingencia que permitan mantener la actividad con una menor disponibilidad de agua fresca. Por último, recientemente se ha descubierto en Estados Unidos una correlación entre la disposición final de agua recuperada en pozos sumideros y actividad sísmica [4] esto supone otro beneficio esperado de aumentar el grado de reutilización del agua recuperada.

El agua generada, como se señaló anteriormente, puede poseer una alta concentración de sales y contaminación por lo que no es siempre apta para ser utilizada para la fractura directamente. Para citar dos ejemplos, actualmente en la cuenca Permian al oeste de Delaware (Estados Unidos) el agua generada se trata antes de ser reutilizada, pero esto no sucede en el caso de la cuenca Appalachian Marcellus, del mismo país. Para los fines experimentales de este trabajo se supondrá que el agua recuperada debe tratarse antes de ser reutilizada.

Respecto al transporte de agua existen dos alternativas principales: a través de ductos y vía camiones. Si bien en Vaca Muerta hay actualmente infraestructura para transportar agua por ductos desde una fuente hasta una locación, no existen al momento ductos para transporte de agua entre locaciones, por lo que la 2da alternativa parece la más apropiada en el corto plazo debido a la inversión necesaria para “tender” una red de ductos.

El uso de agua recuperada plantea el desafío de coordinar la oferta y demanda de agua. Un pozo que está por ser completado requiere una gran cantidad de agua en un período muy corto de tiempo. Este fenómeno contrasta, sobre todo, con el agua que “ofrece” un pozo una vez que entra en producción, la cual se genera con un caudal bajo y continuo en el tiempo. Como en cualquier problema de coordinación en una cadena de suministro una de las respuestas posibles es la generación de inventario a través de nodos de almacenamiento. Estos almacenes pueden distinguirse entre aquellos ubicados anexos a una planta de tratamiento y aquellos que se ubiquen en un *pad* (con una capacidad menor).

En este trabajo se propone el desarrollo de un modelo matemático mixto entero lineal para estudiar, en un escenario inicial, las distintas decisiones a tomar respecto a la logística de recuperación de agua durante las operaciones no convencionales. El modelo matemático propuesto tiene como objetivo determinar:

1. La cantidad de agua fresca que debe extraerse en cada período del horizonte de planificación.
2. Si deben abrirse o no centros de tratamiento para acondicionar el agua recuperada. En el caso afirmativo el modelo decidirá cuánta agua recuperada se tratará por período y cuánta se enviará a disposición final.
3. El nivel de almacenamiento de agua recuperada tanto a nivel de *pad* como a nivel de almacenes intermedios ubicados anexos a los posibles centros de tratamiento.
4. El envío de agua entre nodos a través de camiones cisterna. De este modo también es posible dimensionar el nivel de flota necesaria.

Desarrollo

A lo largo de esta sección se presenta el desarrollo técnico de la solución para el abordaje del problema planteado, detallando (1) los principales *trade-offs* a resolver en el problema, (2) la topología de la red y sus componentes, (3) los principales parámetros, (4) la metodología de resolución, y (5) el planteo del modelo matemático asociado.

Equilibrios a resolver en la gestión de la logística de agua

Planificar la utilización del agua recuperada es equivalente a resolver una serie de *trade off* que involucran no sólo objetivos económicos como minimizar el costo total, sino también objetivos de sustentabilidad, como por ejemplo un target de reutilización. Entre estos *trade off* se destacan:

1. Centralización vs Descentralización del tratamiento de agua recuperada: Instalar una única planta grande con capacidad suficiente (aprovechando economías de escala) o instalar plantas más pequeñas y por lo tanto más costosas, pero obteniendo ventajas en términos logísticos.
2. Reutilizar vs disponer: Elegir el grado de reutilización y dónde se reciclará el agua frente a la posibilidad de llevarla a disposición final (ahorrando el costo del tratamiento).
3. Transporte de agua: El agua fresca se puede transportar, si están disponibles, a través de una red de ductos hacia la localización. Por otro lado, el agua recuperada se tiene que transportar a través de camiones cisterna (lo que implica un costo mucho mayor por m³-km). El balance entre el uso de cada origen de agua dependerá del *trade off* entre las posibilidades de transporte y las distancias implicadas.

Topología de la red y principales componentes del problema

Junto al desarrollo de modelo se genera un caso de estudio que permita analizar los resultados obtenidos por el modelo y generar además sensibilizaciones que permitan estudiar en profundidad los *trade off* antes mencionados.

Para este primer escenario a analizar se generaron datos de 52 períodos de tiempo (semanas) para 50 pozos ubicados en tres posibles *clusters* (A, B y C). Para cada pozo, se consideran tres estados posibles: (1) si el mismo está pendiente de ser fracturado dentro del plan de producción, o (2) si es un pozo que está productivo o pendiente de entrar en producción.

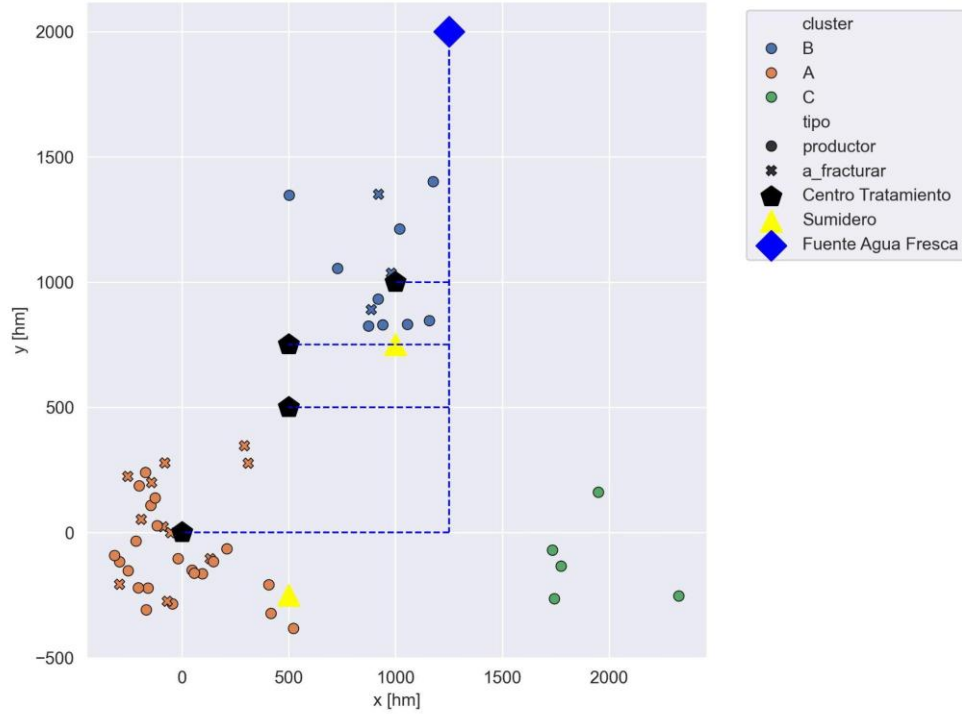


Figura 1: Topología general del escenario propuesto

En la figura 1 se ilustra la topología general del escenario propuesto. Todo punto que tenga una geolocalización será un nodo para el modelo y estará comprendido dentro del *set de nodos* N . En el escenario propuesto existe una única fuente de agua (*set F*) disponible, la cual tiene conexión, a través de ductos, con las locaciones. Para simbolizar esto se conectó la fuente con cada uno de los posibles centros de tratamiento (pentágonos negros) que pertenecen al *set C*. Anexos a los centros de tratamiento se encuentran los posibles almacenes (*set A*). Los pozos se dividen, como se mencionó anteriormente, según el cluster al que pertenecen (se puede ver a través de los colores rojo, azul y verde) y el estado del pozo (a completar o productor) según sean círculos o cruces (*sets PP* y *PF*). Existen dos pozos sumideros que se simbolizan con triángulos amarillos (*set S*).

Generación de datos de producción, demanda y flowback

El inicio de la producción de los pozos se reparte de forma uniforme a lo largo de todo el periodo. Para simular la producción de agua se utiliza una fórmula de decaimiento como la que puede observar en la ecuación 1 a continuación:

$$P_t = P_0 * e^{-\alpha t} \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde P_t es el agua de producción generada en el período t , P_0 es el agua de producción generada en el período inicial (para lo cual se utiliza una distribución uniforme entre 3000 y 5000 metros cúbicos) y, por último, α es un factor de decaimiento que se genera con una

distribución uniforme entre 0.02 y 0.05 con el objetivo de dotar de variabilidad a los datos del caso de estudio. A través de este procedimiento se genera un parámetro del modelo llamado *producción*.

Para los datos de fractura se consideró 4 semanas por fractura y 5 semanas entre el fin de la fractura y la generación del *flowback*. El inicio de la fractura de cada pozo es un dato del problema, siendo correspondiente a una de las semanas del horizonte considerado, mientras que la finalización se calcula como el inicio más las 4 semanas de fractura, dando lugar a los parámetros *inicio_fractura* y *fin_fractura*. En relación con la demanda de agua para la fractura, el parámetro *demanda* asociado a cada pozo tiene un valor entre 75000 y 100000 metros cúbicos por semana. Luego, como no todos los pozos devuelven la misma cantidad de *flowback*, cada pozo a fracturar tiene su correspondiente parámetro, denominado *flowback*, que se mueve entre 0.2 y 0.5, determinando qué porcentaje del agua inyectada será recuperada durante la etapa de “devolución”. Para calcular el *flowback* recuperado cada semana se utilizó una ecuación equivalente a la propuesta para el agua de producción, asumiendo el correspondiente decaimiento, pero con un factor fijo de 0.1 para todos los casos.

En la figura 2 se puede apreciar la evolución del agua demandada y el agua generada (tanto por producción y *flowback*) a lo largo de las 52 semanas del escenario.

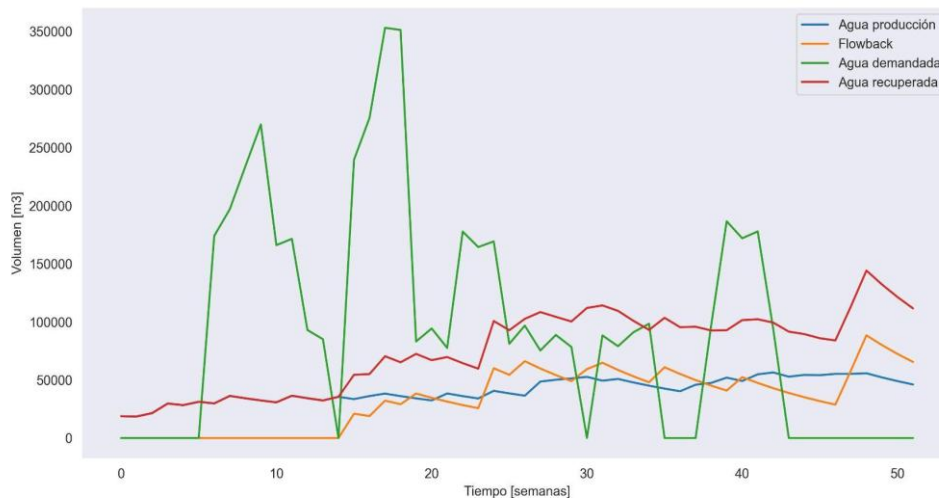


Figura 2: Evolución generación de agua y demanda

En un caso real es de esperarse que el agua demandada tenga un patrón algo más estable ya que los valles indican momentos dónde no se está fracturando lo cual, considerando el costo por hora de los *sets* de fractura, no es esperable. Sin embargo, existen múltiples recursos a coordinar en este tipo de explotaciones con su correspondiente complejidad, por lo cual pueden esperarse este tipo de patrones. Desde el punto de vista del modelo, la intermitencia en la demanda puede resultar en un escenario más desafiante dónde la coordinación entre oferta y demanda sea más compleja.

En la tabla 1 se resumen las principales métricas que sirven como input para el modelo.

Concepto	Valor	Unidad	Nombre en modelo
Capacidad freshwater	∞	m3/semana	
Capacidad sumidero	85000	m3/semana	cap_{dis}
Capacidad almacenamiento en locación	15000	m3	cap_{pad}
Capacidad almacenamiento en centro	80000	m3	cap_{alm}
Capacidad tratamiento en centro*	20000	m3/semana	cap_{ct}
Tasa de recuperación*	0.82	-	$efic_{tr}$
Capacidad vehículo	40	m3/veh	$capacidad_{vehiculo}$
Velocidad promedio	40	km/h	$velocidad$
Costo disposición final	0.09	USD/m3	$costo_{disposal}$
Costo tratamiento*	0.25	USD/m3	$costo_{tr}$
Costo freshwater	0.25	USD/m3	$costo_{freshwater}$
Costo <i>trucking</i>	100	USD/h	$costo_{trucking}$
Costo apertura centro*	660000	USD	$capex_{tratamiento}$
Costo apertura almacén	33000	USD	$capex_{almacen}$

Tabla 1: Valores de los principales *inputs*. *Se tomó como referencia un equipo de evaporación múltiple para la capacidad propuesta. En el futuro se pueden incluir diferentes tecnologías cada una con sus economías de escala.

Como el horizonte temporal se encuentra circunscripto a un año no se consideró la posibilidad de expandir la red de ductos actual para contemplar el transporte de agua entre locaciones (lo cual operativamente es significativamente más barato que el transporte a través de camiones cisterna) porque la inversión no se justificaría con un solo año de operación. De esta manera, se asume que la red logística está dada en términos de modos de transporte.

En la tabla 1 se pueden apreciar varios valores, la mayoría de los cuales no requiere explicación adicional, sin embargo, la *tasa de recuperación* no fue introducida previamente. La misma depende de la tecnología utilizada para tratar el agua recuperada y establece qué proporción de agua apta para fractura se obtiene a través del proceso. Un punto que todavía no se trató y que queda por fuera del alcance de este trabajo es el efecto que tiene la reutilización del agua recuperada en la salinidad del *flowback*. A medida que el agua es reciclada, la concentración de sales en el agua de *flowback* crece hasta el punto en que no es posible, a través de tecnologías básicas, volverla reutilizable, volviéndose necesario desalinizar la misma.

Actualmente existen modelos que son capaces de *trackear* la carga de sales del agua para tener en cuenta este fenómeno, como es el caso del proyecto PARETO [5]. En el contexto de esta propuesta, es un punto a incorporar en el trabajo futuro.

Metodología

Para la resolución del problema se optó por utilizar la optimización a través de la programación matemática. Este paradigma tiene una serie de ventajas frente a otros métodos como las heurísticas y metaheurísticas:

1. En el caso de modelos con restricciones lineales y funciones objetivo convexas existe garantía de optimalidad, i.e, se puede garantizar que la solución obtenida es la mejor solución posible.
2. Permiten la inclusión de restricciones y consideraciones *ad hoc* que otros paradigmas no. De esta forma la representación que se obtiene del fenómeno bajo estudio tiende a ser un reflejo más real y por lo tanto más adecuado de la situación original.
3. Una vez desarrollado el modelo es sencillo generar sensibilizaciones o evaluar escenarios alternativos. Así, se puede estudiar el grado de robustez de la solución obtenida frente. Esto es de especial interés cuando ciertos parámetros de entrada que se suponen deterministas están sujetos a aleatoriedad en el mundo real.

En el caso del modelo desarrollado para este trabajo, el mismo se clasifica como mixto entero lineal (MIP o MILP) ya que las restricciones son ecuaciones lineales, existiendo variables tanto continuas como enteras (por ejemplo, el flujo entre dos puntos es una variable continua, pero la decisión de abrir o no un centro de tratamiento es binaria).

Restricciones del modelo matemático

En la ecuación 2 se muestra la restricción correspondiente a la satisfacción de la demanda.

$$demanda[n, t] = \sum_{i \in FUA}^N Q_{[i, n, t]} + OUT_{ALML[n, t]} - IN_{ALML[n, t]} \quad \forall n \in PF \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (2)}$$

Esta restricción establece que para todos los pozos a fracturar la demanda de agua en cada período debe ser satisfecha a través del transporte (Q) de agua fresca desde una fuente o de agua tratada (proveniente de un almacén) o por último a través de las reservas de la misma locación. Toda el agua que llega que no es demandada es agua que se almacena para futuros períodos.

Por otro lado, hay que resolver el balance de agua de la oferta, i.e, encargarse de los balances del agua de producción y del *flowback*. Los mismos se encuentran en las ecuaciones 3 y 4 a continuación.

$$produccion[n, t] = \sum_{i \in CUS}^N Q[n, i, t] \quad \forall n \in PP \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (3)}$$

$$flowback[n, t] = \sum_{i \in CUS}^N Q[n, i, t] \quad \forall n \in PF \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (4)}$$

Las ecuaciones 3 y 4 aseguran que toda el agua de producción o *flowback* generada en un pozo en un dado periodo tiene que ser enviada, o bien a uno de los centros de tratamiento (C), o a un pozo sumidero (S).

El agua almacenada (ALM_L) en una locación al final de un período surge de un balance de masa simple entre lo que arribó y lo que se utilizó. Además, el agua almacenada al final de un período no puede superar la capacidad de la locación ni se puede almacenar agua una vez que se terminó la fractura. Esto puede apreciarse en las siguientes tres ecuaciones (Ec. 5 – Ec. 7):

$$ALM_L[n, t] = LM_L[n, t - 1] - OUT_ALM_L[n, t] + IN_ALM_L[n, t] \quad \forall n \in PF \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (5)}$$

$$ALM_L[n, t] \leq cap_{pad} \quad \forall n \in PF \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (6)}$$

$$ALM_L[n, t] \leq 0 \quad \forall n \in PF \quad \forall t \in T / t \geq fin_fractura[n] \quad \text{Ec. (7)}$$

Todo lo que llega a un centro de tratamiento debe tratarse (TR) y almacenarse para su posterior uso. La parte del agua que no puede recuperarse debe enviarse a un sumidero para su disposición final. Esto puede apreciarse en las ecuaciones 8 y 9. Por último, la ecuación 10 asegura que no pueda tratarse nada en un dado centro a menos que el mismo esté habilitado, i.e, que la variable binaria x asociada adopte el valor 1.

$$TR[c, t] = \sum_{i \in PPUF} Q[i, c, t] \quad \forall c \in C \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (8)}$$

$$TR[c, t] = efic_{tr} \sum_{i \in A} Q[c, a, t] + (1 - efic_{tr}) \sum_{s \in S} Q[c, s, t] \quad \forall c \in C \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (9)}$$

$$TR[c, t] \leq cap_{ct} * x[c] \quad \forall c \in C \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (10)}$$

Al igual que con el caso del almacenamiento en *pad* se tiene que modelar el almacenamiento intermedio anexo a los centros de tratamiento. Las ecuaciones correspondientes son similares al caso de las ecuaciones 5 a 7 y, por lo tanto, se omiten.

A continuación, se calcula el grado de reutilización. Si bien este valor se puede calcular de diferentes formas, por simplicidad se decide calcular de manera global, considerando el total de agua fresca extraída (FW_TOTAL) y, conocida la demanda total de agua del sistema, se puede calcular la reutilización alcanzada. Esto se aprecia en las ecuaciones 11, 12 y 13.

$$FW[f, t] = \sum_{i \in PF} Q[f.i.t] \quad \forall f \in F \quad \forall t \in T \quad \text{Ec. (11)}$$

$$FW_{TOTAL} = \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} FW[f, t] \quad \text{Ec. (12)}$$

$$1 - \frac{FW_{TOTAL}}{demanda_{total}} \geq target \quad \text{Ec. (13)}$$

Respecto a los costos, se tienen en cuenta las inversiones para los centros y almacenes que se decidan abrir, el costo de tratamiento del agua, el costo de disposición final, el costo de almacenamiento y el costo del agua fresca extraída. Por último, se tienen en cuenta los costos de transporte, tanto a través de camiones como a través de ductos. Las ecuaciones 14 a 19 computan los términos económicos mencionados.

$$CAPEX = \sum_{ct \in C} x[ct] * capex_{tratamiento} + \sum_{st \in ST} y[st] * capex_{almacen} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$COSTO_{TRATAMIENTO} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} TR[c, t] * costo_{tr} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$COSTO_{FW} = FW_{TOTAL} * costo_{freshwater} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$COSTO_{DISPOSAL} = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{i \in PF \cup PPUC} Q[i, s, t] * costo_{disposal} \quad \text{Ec. (17)}$$

$$COSTO_{TRUCKING} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{t \in T} Q[i, j, t] * \frac{costo_{trucking} * distancia[i, j]}{capacidad_{vehiculo} * velocidad} \quad i, j \notin F \quad \text{Ec. (18)}$$

$$COSTO_{PIPING} = \sum_{i \in F} \sum_{j \in PF \cup PP} \sum_{t \in T} Q[i, j, t] * costo_{piping} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$COSTO_{TOTAL} = CAPEX + COSTO_{TRATAMIENTO} + COSTO_{FW} + COSTO_{DISPOSAL} + COSTO_{TRUCKING} + COSTO_{PIPING} \quad \text{Ec. (19)}$$

Por último, la función objetivo del problema se puede apreciar en la ecuación 20.

$$\text{Min } COSTO_{TOTAL} \quad \text{Ec. (20)}$$

Resultados

El modelo fue desarrollado en Python 3.11 a través de la librería Pyomo y resuelto con Gurobi 12.0 como *solver* en una computadora con un procesador AMD Ryzen 7 5800H con 3.2GHz y 16 GB de RAM.

Resolución del caso base - Exigencia del 10% de reutilización.

En este caso inicial se decide exigir a la solución un *target* de reutilización igual a una proporción mínima de reciclaje del 10% de la demanda total a lo largo del horizonte considerado.

El costo total para satisfacer la demanda de agua y el *target* de reciclaje impuesto (las dos principales restricciones del modelo) asciende a 25.85 MUSD. De los cuales el 60% corresponde al costo de transporte a través de camiones. El modelo decide abrir el centro 1, lo cual es lógico ya que desde el punto de vista logístico es el que está más cercano al cluster A, el más grande y con mayor demanda. La utilización de este centro asciende al 65% de su capacidad global.

En términos de la recuperación total de agua, la solución óptima supera al valor *target* establecido y asciende al 20%, es decir, que en el caso de instalar tratamiento es más económico llegar a un 20% de recupero que mantenerse en el 10% exigido. Esto puede explicarse analizando el costo total de utilizar un metro cúbico de agua fresca en comparación con un metro cúbico de agua recuperada. En la ecuación 21 se aprecia el cálculo para el primer caso y en la ecuación 22 para el segundo.

$$costo_{FW} \left[\frac{usd}{m^3} \right] = costo_{freshwater} + costo_{piping} * distancia \quad Ec. (21)$$

$$costo_{RECUPERADA} \left[\frac{usd}{m^3} \right] = costo_{tr} + costo_{trucking} * distancia + \frac{capex}{capacidad * 52} \quad Ec. (22)$$

Como el costo del agua fresca ($Costo_{FW}$) es igual al costo de tratamiento ($Costo_{TR}$) se puede obviar ese análisis. Luego, el término que incluye al capex surge de reconocer que, para poder recuperar agua, se requiere una inversión además de un costo operativo. Si se prorratea esa inversión por el periodo de tiempo total y la capacidad disponible en cada periodo de tiempo, lo que supone una subestimación ya que probablemente no se pueda utilizar al máximo todos los periodos, se obtiene el costo por m³ final del agua reutilizada. Ergo, los casos en los que sea más económico utilizar agua recuperada serán los que cumplan con la desigualdad planteada en la ecuación 23.

$$costo_{trucking} * distancia1 + \frac{capex}{capacidad * 52} \leq costo_{piping} * distancia2 \quad Ec. (23)$$

Donde *distancia1* y *distancia2* representan las distancias entre el centro de tratamiento y el pozo a fracturar, y la distancia entre la fuente de agua y el pozo a fracturar, respectivamente. El costo asociado a la inversión por metro cúbico asciende a 0.64 [usd/m³], mientras que los

costos por km para el *trucking* y el *piping* son respectivamente 0.0635 y 0.01 [usd/km*m³]. Para ejemplificar se propone el siguiente caso, en donde el centro de tratamiento se encuentra a 10 [km] del pozo a fracturar y la fuente de agua a 150 [km]. Los correspondientes costos por m³ para ambos casos ascenderían a 1.525 y 1.75 [usd/m³] respectivamente, siendo más económica la opción de utilizar el agua tratada.

Cuando se analiza el nivel de sustitución del agua fresca se observa que el cluster A tiene un nivel de reutilización del 25%, frente a un 4.3% del cluster B y un 0% del cluster C. Esto se explica por la presencia del centro de tratamiento en el cluster A, siendo menos competitivo transportar el agua tratada al cluster B y C si se aplica el mismo criterio desarrollado previamente.

En la figura 3 se puede ver la evolución en el uso del CT1, la cual presenta fluctuaciones notables. Esto coincide con las fluctuaciones que exhibía la demanda de agua para fractura en la figura 2. Cuanto mayor es la proporción de agua de producción y *flowback* respecto de la demanda, mayor es el uso del centro de tratamiento. El uso de la capacidad instalada en el CT1 asciende al 65% en términos globales pese a las fluctuaciones que se observan.

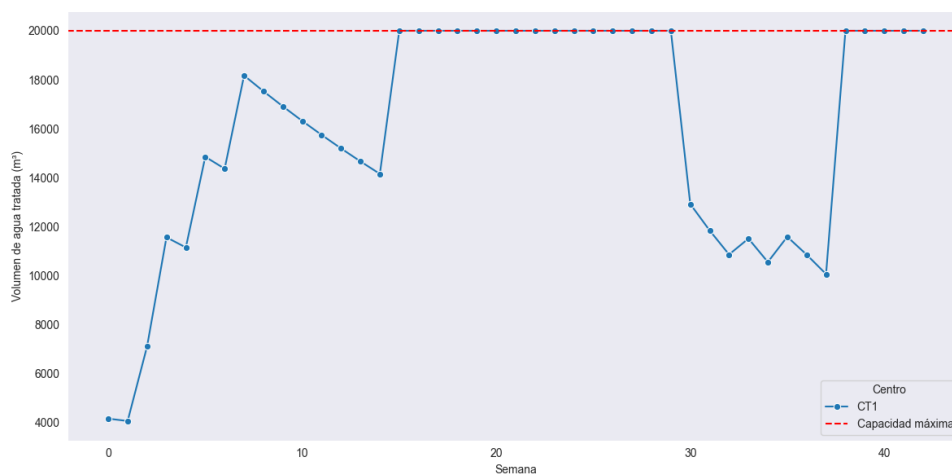


Figura 3. Uso del centro de tratamiento 1

Para el caso del uso del almacenamiento en el CT1 la evolución del agua almacenada se puede apreciar en la figura 4. Cabe destacar que finalmente se exige que el almacén no termine lleno para evitar que el modelo aproveche que el agua que se envía al almacén y no se utilice no deba ser transportada finalmente en el contexto del modelo.

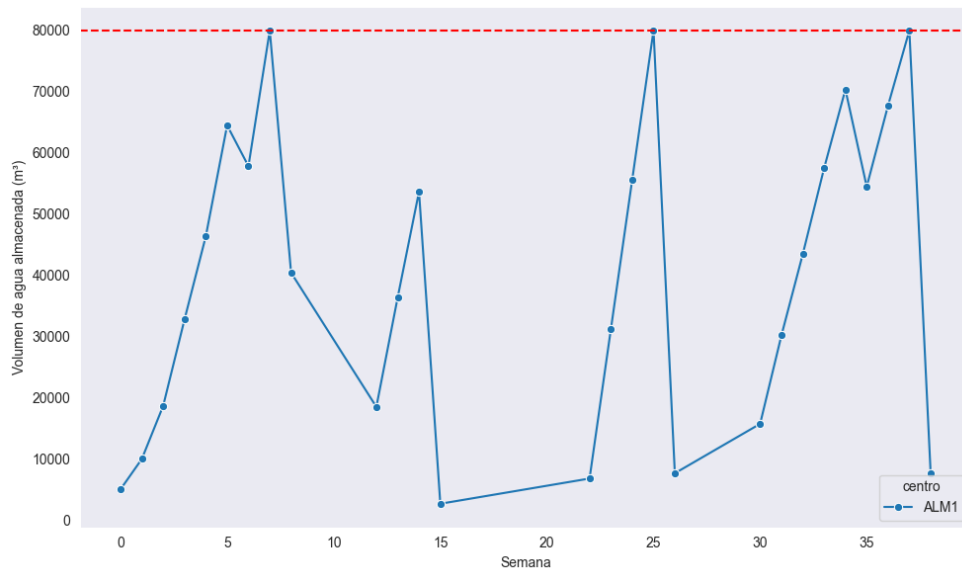


Figura 4: Uso del almacén 1

Respecto al uso del agua fresca, en la figura 5 se puede observar la cantidad extraída por semana. Si bien se supuso que esta capacidad es ilimitada en el caso base, esto se puede sensibilizar en análisis posteriores. Observar que el uso más intensivo es al comienzo, donde no hay disponibilidad de agua tratada en los puntos de almacenamiento y en los periodos donde la demanda tiene picos muy marcados. En las semanas finales se observa un uso lentamente creciente, coincidente con la baja gradual de la disponibilidad de agua tratada previamente.

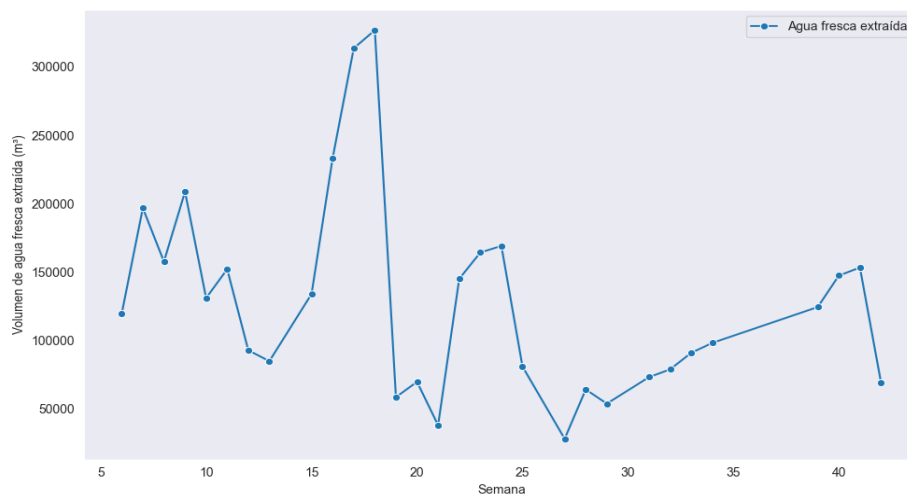


Figura 5. Agua fresca extraída por período

Si se limitase la capacidad del agua fresca extraída por período, el modelo debería tender a naturalmente aumentar el nivel de reutilización, no obstante, si la capacidad fuese muy limitada la solución podría tornarse infactible. Un caso de uso alternativo del modelo podría ser que, ante una escasez de agua, seleccionar qué pozos se deben priorizar para la fractura aunque, esto requeriría información y modelado adicional.

Finalmente, en la figura 6 se aprecia la evolución en el uso de cada pozo sumidero. El pozo sumidero 1 se encuentra cercano al cluster A y, por lo tanto, es el más utilizado. En el caso alternativo se limitará la capacidad de los pozos sumideros y se evaluará el efecto en la solución obtenida.

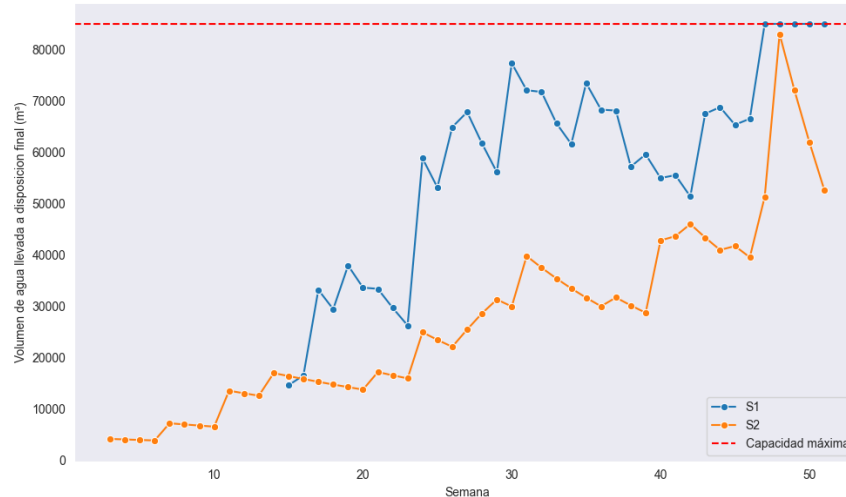


Figura 6: Uso de pozos sumidero

Caso de estudio alternativo - Exigencia del 50% de reutilización.

En este caso se plantea un escenario alternativo en dónde el target de reutilización exigido asciende al 50%. Es de esperar que, ya que el CT1 se encontraba trabajando al 65% de su capacidad global en el caso previo, no baste con solo abrir un centro de tratamiento en este escenario.

Al analizar la solución, en este caso el costo total asciende a 30 MUSD (casi 5 MUSD extras o un 14% adicional respecto del caso base). En particular, se abren los centros de tratamiento 1, 2 y 3 con utilizaciones globales de 68%, 54% y 54% respectivamente. Es importante resaltar que, frente al caso original donde se exigía un nivel de reutilización mínimo del 10% y se hallaba una solución óptima con el 20%, en este caso la solución óptima coincide con el valor exigido, i.e, la restricción está “activa”. Dicho de otra forma, si no se exigiera un 50% de reutilización no sería conveniente desde el punto de vista económico alcanzar tal nivel.

En las figuras 7, 8 y 9 se puede ver el uso de los centros de tratamiento, los almacenes y los pozos sumideros para el caso alternativo.

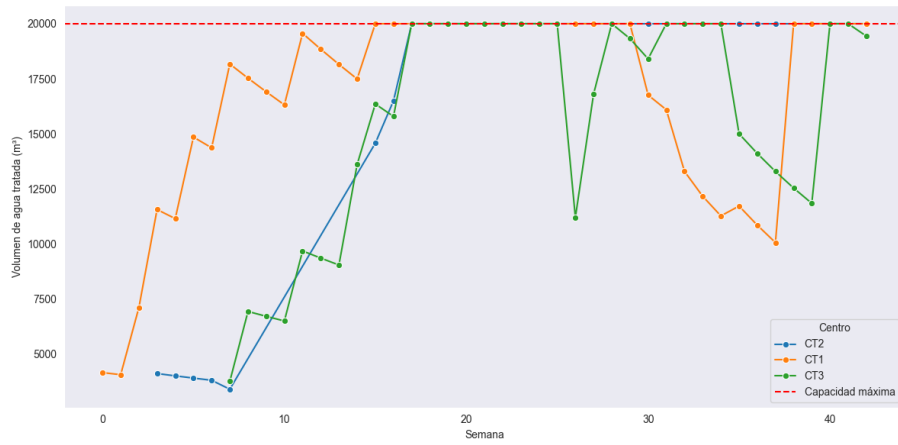


Figura 7. Uso de los centros de tratamiento para el caso alternativo

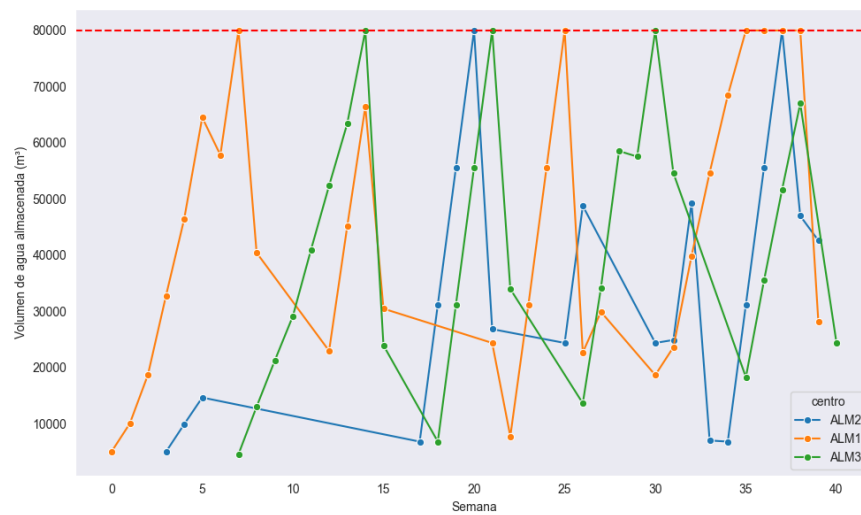


Figura 8. Uso de los centros de almacenamiento para el caso alternativo.



Figura 9. Uso de pozos sumidero en el caso alternativo.

Los tres centros de tratamiento se utilizan al máximo en el periodo 20, lo cual coincide con el pico de demanda que se observa en la figura 2. Respecto al uso del almacenamiento, se puede apreciar un comportamiento tipo dientes de sierra muy marcado para los tres almacenes. Por último, respecto al uso de los pozos sumideros, cabe destacar que en los periodos finales el comportamiento es idéntico al observado en el caso inicial y se aprecia que la capacidad está casi al máximo de la permitida.

Frente de Pareto

Finalmente se construye una aproximación al frente de Pareto para las dos principales variables involucradas: el costo total y el grado de reutilización del agua. El frente de Pareto en este caso es el conjunto de soluciones óptimas mirando dos objetivos en simultáneo: la minimización de los costos y la maximización de la reutilización (impuesta como un *target* a alcanzar). Para cada punto en el frente de Pareto se puede asegurar que no es posible moverse a otro punto sin generar un sacrificio en uno de los dos objetivos, o bien aumentan los costos o bien se disminuye el porcentaje de reutilización. El mismo se puede observar en la figura 10.

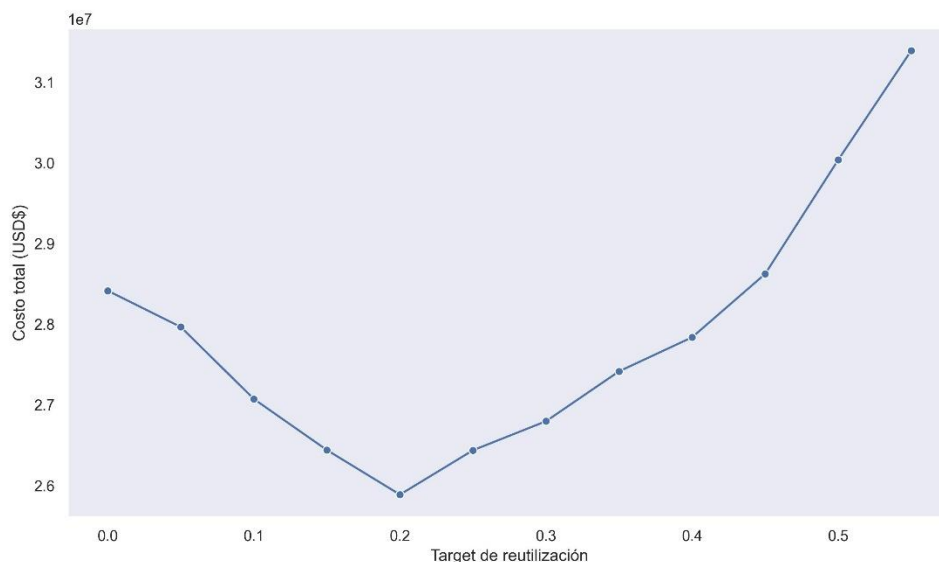


Figura 10: Aproximación al frente de Pareto para las variables costo y target de reutilización

Inicialmente, a medida que se incrementa la reutilización el costo total disminuye hasta llegar a un punto en el que empieza a aumentar (típico comportamiento de una función de costos convexa). Notar que en este sentido, los puntos a la izquierda del 0.2 de *target* no pertenecen al frente de Pareto de este problema ya que, partiendo de un punto a la izquierda como 0.05 de utilización es posible mejorar ambos objetivos a la vez seleccionando un punto a la derecha menor o igual a 0.2.

Cabe destacar que no se pudieron obtener soluciones con más del 55% de reutilización global del agua ya que el modelo se torna infactible. Esto se debe a la combinación de dos fenómenos: la capacidad limitada de los centros de tratamiento disponibles y el comportamiento de la oferta de agua a recuperar.

Finalmente, es interesante observar en la figura 11 como decrece el uso de agua fresca a medida que aumenta el nivel de reutilización exigido.

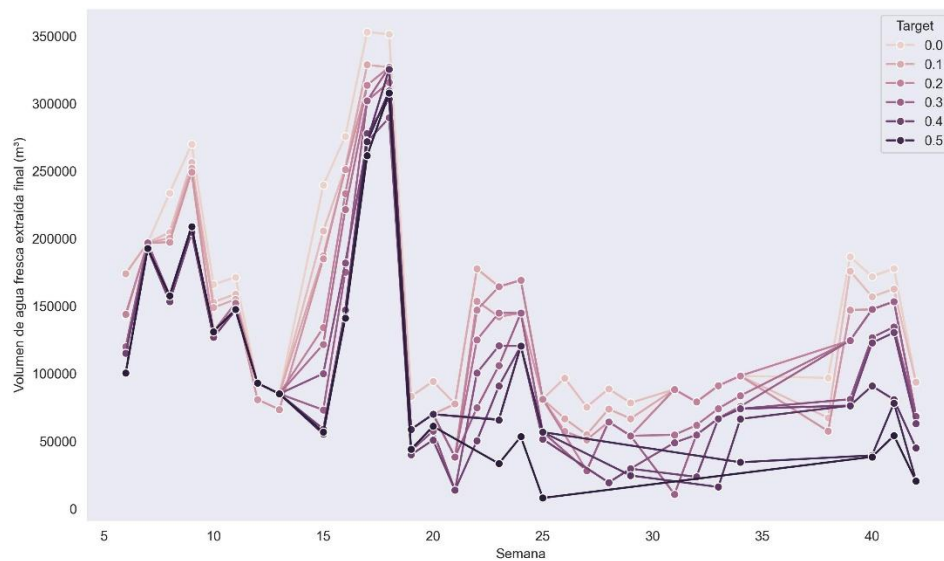


Figura 11: Uso de agua fresca para distintos niveles de reutilización

Conclusiones

El crecimiento en la actividad de Vaca Muerta junto a la tendencia a la baja en el valor del Brent y la necesidad de contar con operaciones más rentables, impone desafíos y oportunidades que deberán ser resueltos en los próximos años. En este sentido, la optimización de la logística del agua de fractura puede convertirse en una ventaja competitiva que permita, por un lado, disminuir los costos y por lo tanto aumentar la competitividad, y por otro lado, desarrollar las actividades de forma más sustentable.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo matemático que permite la optimización de las actividades de recuperación, tratamiento y disposición final del agua de producción y *flowback*. El modelo permite la minimización de los costos totales teniendo en cuenta un grado o *target* mínimo de reutilización. Más aún, se construyó una aproximación al frente de Pareto para estudiar la competencia entre la reutilización del agua y el costo total del sistema.

Contar con un modelo para estudiar la logística del agua permite a los planificadores y tomadores de decisiones evaluar escenarios alternativos y adaptarse ante condiciones cambiantes tanto en términos de costos, como tecnológicas o de regulación.

En el futuro se buscará seguir profundizando y aumentando la complejidad del modelo para, con horizontes de tiempo más extensos, incluir inversiones relacionadas a la red de ductos y la evaluación de tecnologías de tratamiento. Se puede visionar la creación de dos modelos con fines complementarios: uno estratégico que decida sobre la topología general de la red a largo plazo, y otro a corto plazo que permita, dada una topología, minimizar el costo total de operación de la red de agua dado un cronograma de actividades en firme.

Bibliografía

- [1] A. Ramos-Peon, Argentina Oil & Gas Outlook: The Path to >1 MMbpd in Vaca Muerta, presentación en el evento H24 organizado por el IAPG, mayo 2024. Accedido el 9 de mayo de 2025.
- [2] M. G. Drouven, D. C. Cafaro, I. E. Grossmann, Mathematical programming models for shale oil & gas development: a review and perspective, *Computers & Chemical Engineering* 177 (2023) 108317.
- [3] A. Ondeck, M. Drouven, N. Blandino, and I. E. Grossmann, “Multi-operational planning of shale gas pad development,” **Computers & Chemical Engineering**, vol. 126, pp. 83–101, 2019.
- [4] R. M. Pollyea, M. C. Chapman, R. S. Jayne, H. Wu, High density oilfield wastewater disposal causes deeper, stronger, and more persistent earthquakes, *Nature communications* 10 (1) (2019) 3077. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-019-11029-8>
- [5] M. G. Drouven, A. J. Cald’eron, M. A. Zamarripa, K. Beattie, Pareto: An open-source produced water optimization framework, *Optimization and Engineering* 24 (3) (2023) 2229–2249.

Nomenclatura y referencias

Breve CV:

Nombre y apellido: Franco Gastón Espinaco

Título y lugar de estudio: Ingeniero Industrial, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral (U.N.L).

Trayectoria: Más de tres años de experiencia en proyectos de optimización y ciencia de datos para la resolución de problemas reales de la industria energética y de manufactura. Actualmente doctorando en Ingeniería Matemática

Cargo actual en la empresa: Líder técnico

Nombre y apellido: Agustín Francisco Montagna

Título y lugar de estudio: Doctor en Ingeniería Industrial (UTN – FRSF). Ingeniero Industrial (FIQ – UNL)

Trayectoria: Dirección general en Nonlinear Tecnología. Seguimiento de proyectos de optimización. Participación en variados proyectos de aplicación de herramientas de *decisión intelligence* para la industria del O&G, en particular en operaciones no convencionales.

Cargo actual en la empresa: Dirección de proyectos de optimización.