



Golfo San Jorge: la remediación ambiental y la capacidad de respuesta, claves para resolver contingencias de la operación

Por **Federico Sameghini** y **Pablo Barquín**
de Tecpetrol S.A.

Se describen aquí las tareas de remediación realizadas por la empresa tras un derrame de hidrocarburos causado por la surgencia imprevista de petróleo y gas durante la terminación de un pozo en el Chubut. El plan de remediación que se utilizó fue novedoso por las características del derrame y por las nuevas tecnologías utilizadas, con resultado exitoso.

Trabajo seleccionado por el Comité Organizador del 1.º Congreso Latinoamericano y 3.º Nacional de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente.

El objetivo final de todo sistema de gestión ambiental debe ser la prevención de la contaminación así como la disminución de la afectación de recursos. No obstante, dentro de la estructura y de las prácticas operativas de cada sistema implementado en una empresa petrolera, inexorablemente, se deben incluir, en forma transversal, los principios de restauración (para recuperar lo máximo posible las condiciones ambientales originales postdisturbio intrínseco de la actividad productiva) y los de remediación (para recuperar lo máximo posible las condiciones ambientales originales postdisturbio proveniente de un incidente no previsto). El presente trabajo está referido a la remediación ambiental.

El 17 de marzo del 2007, durante las tareas de terminación de un pozo, perforado por Tecpetrol en el área El Tordillo, Provincia del Chubut, comenzó una surgencia imprevista de petróleo y de gas proveniente de dicho pozo. Los fuertes vientos de ese día y del posterior al-

canzaron ráfagas de hasta 120 km/h y esparcieron el hidrocarburo en forma de *spray* en los alrededores de la ubicación del pozo en dirección este.

Debido a las características y a la magnitud del evento ocurrido (aproximadamente 300 ha con distintos grados de afectación), durante el proceso de remediación se requirió una gestión diferente a la usual, que incluyó la utilización de metodologías novedosas así como una combinación eficiente de tecnologías y procesos ya conocidos.

En este informe se realiza un detalle de las actividades llevadas a cabo durante las distintas etapas de la remediación, así como un resumen de los diferentes estudios, estadísticas, muestreos y análisis químicos realizados.

Vale destacar que el alcance del informe sólo se limita al análisis y la descripción del plan de remediación ambiental implementado y no incluye un detalle de la investigación de las causas que originaron el evento.

El área El Tordillo se encuentra localizada en el departamento Escalante de la Provincia del Chubut, a 50 km de la ciudad de Comodoro Rivadavia, dentro del flanco norte de la cuenca del golfo San Jorge. Es operado por Tecpetrol desde julio de 1991. Conforme con la clasificación climática de Thornthwaite (basada en el balance hídrico de la región y para el área), corresponde a un clima de tipo árido mesotermal, con nulo exceso de agua y concentración térmica estival. Los fuertes vientos del oeste, así como las escasas precipitaciones, constituyen elementos determinantes de la extrema aridez local.

Los suelos presentan características arenosas-arcillosas y alta friabilidad a la erosión. Son suelos incipientes que carecen de estructura, con escaso desarrollo vertical, comunes en regiones áridas con bajo contenido de materia orgánica y humedad. Desde el punto de vista fitogeográfico, la zona se ubica en la provincia patagónica, distrito del golfo San Jorge (Soriano A. 1956, Cabrera A. 1971), caracterizada por la presencia dominante de estepas de malaspina (*Retanilla patagónica*) y duraznillo (*Colliguaja integerrima*). La flora local es escasa, con fisonomía de estepa arbustiva rala y baja cobertura vegetal.

1. Desarrollo

1.1. Respuesta inicial

En forma inmediata a la detección del evento, se activó el plan de contingencias de la empresa en el área, el cual es actualizado anualmente y monitoreado por terceros.

Se implementaron las prácticas comunes en este tipo de situaciones: se realizó la evaluación del estado del pozo involucrado y, en función de ello, se realizó la inyección de agua de producción a través de la válvula lateral de su BOP (*Blow Out Preventer*). Además, se incrementó la reinyección de agua de producción de dos pozos inyectoros localizados en las cercanías del pozo, previo cegado del acceso a la formación geológica de donde provenía la surgencia. La finalidad era que el agua ingresara en las capas superiores e inundase al pozo involucrado. Estas operaciones buscaban también disminuir la presión y la temperatura del fluido que estaba surgiendo y, de esta forma, intentar detener la surgencia. Por otro lado, se contrató la asistencia de personal internacional especializado en la resolución de este tipo de eventos.

Como resultado de todas estas acciones, a los 4 días del inicio de la contingencia, se logró controlar la surgencia del pozo y evitar que el fluido continuara alcanzando la superficie. Desde el punto de vista legal e institucional, se dio aviso de inmediato a las autoridades de aplicación nacional (Secretaría de Energía de la Nación) y provincial (Ministerio de Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable y Secretaría de Hidrocarburos y Minería del Chubut), de manera formal (mediante los mecanismos previstos por la Resolución SE 24/05) e informal (reuniones).

1.2. Evaluación y caracterización del área afectada

Los recursos naturales involucrados fueron el suelo y la vegetación arbustiva de la zona. No se produjo afectación de cuerpos de agua ni de mallines. Por lo tanto, no habiéndose comprometido las áreas de mayor sensibilidad ambiental del yacimiento, la afectación se consideró de carácter reversible.

Tampoco se produjo afectación del agua subterránea. Dicha afirmación se basó en lo siguiente:

- Observando los distintos grados de infiltración del hidrocarburo en el suelo a través de las calicatas y los muestreos realizados, el fluido nunca superó los primeros 20 cm del suelo.
- El muestreo y análisis químico de los 5 freáticos perforados en la zona afectada no arrojó ningún parámetro fuera de los límites permisibles establecidos por la legislación vigente.
- En forma inmediata al momento de control de la surgencia, se comenzó a realizar un estudio con el objeto de delimitar el área total involucrada por el derrame y, a su vez, zonificar la superficie total identificando las prioridades de intervención de cada sector. La metodología utilizada incluyó:
 - La realización de calicatas y los correspondientes muestreo y análisis de suelo.
 - La toma de fotografías de la vegetación involucrada.
 - El muestreo y la limpieza de vegetación mediante papel absorbente para detectar la eventual presencia de hidrocarburo.
 - La delimitación de las zonas marcando sus contornos con GPS Garmin GPS map 76 CSx.
 - Los datos fueron procesados y volcados sobre una imagen satelital.
 - Como criterio para la zonificación, se tomaron los dos parámetros relacionados con los recursos afectados por el derrame: grado de afectación de la vegetación y grado de afectación del suelo. En función de ello, se delimitaron los siguientes sectores:

• Sector 0: Prioridad de intervención inmediata

En dicho sector, la vegetación se encontraba totalmente rociada por petróleo/agua por efecto de la precipitación directa desde la zona de surgencia y el suelo se hallaba cubierto con petróleo/agua sobrenadante.

El área total del sector 0 era de 11,3 hectáreas: 4,6 ha con vegetación y suelo involucrados, conforme a lo detallado anteriormente; y 6,7 ha en las que el fluido derramado escurrió naturalmente e impactó sólo el suelo. La vegetación no fue afectada en forma directa. A pesar de ello, debido a que resulta



Primer plano del hidrocarburo derramado en el sector 0.

la zona donde circuló el mayor volumen del fluido así como donde se realizaron las obras de contención primarias, fue identificado también como sector de prioridad de intervención inmediata.

• **Sector 1: Prioridad de intervención intermedia**

En dicho sector, la vegetación se encontraba afectada en diferentes proporciones, pero nunca en su totalidad, incluso con importantes zonas sin afectar. Los ejemplares arbustivos fueron afectados por el efecto del viento que distribuyó el spray del hidrocarburo y no por el impacto directo de la surgencia. El suelo fue levemente afectado por el spray, comprobado por el hecho de que al transitarlo se verificaba la existencia de suelo sin afectar. Área total del sector 1: 30 hectáreas.



Sector 1. Impacto medio de la vegetación y bajo del suelo.

• **Sector 2: Prioridad de intervención baja**

En dicho sector, el suelo se encontraba sin daños y la vegetación fue levemente afectada por el spray del hidrocarburo, pero sin comprometer ni representar un riesgo para su normal desarrollo y metabolismo. Área total del sector 2: 260 hectáreas (aproximadamente).

En la imagen satelital, se pueden apreciar los sectores identificados.

1.3. Plan de remediación implementado

En forma inmediata al control de la fuente del vertido (control de la surgencia), la empresa comenzó con la planificación e implementación del Plan de Remediación Ambiental, que incluyó las siguientes etapas:



Sector 2. Se puede apreciar el bajo impacto sobre los recursos.



Imagen satelital.

1. Contención (iniciada en paralelo a las tareas de control de la surgencia).
2. Recuperación.
3. Limpieza y remediación.
4. Tratamiento y disposición final de los sólidos empujados.
5. Restauración ambiental.
6. Monitoreo.

El cronograma cumplido para todas y cada una de las etapas es el que figura en la página siguiente.

A continuación, se presenta un detalle de cada etapa:

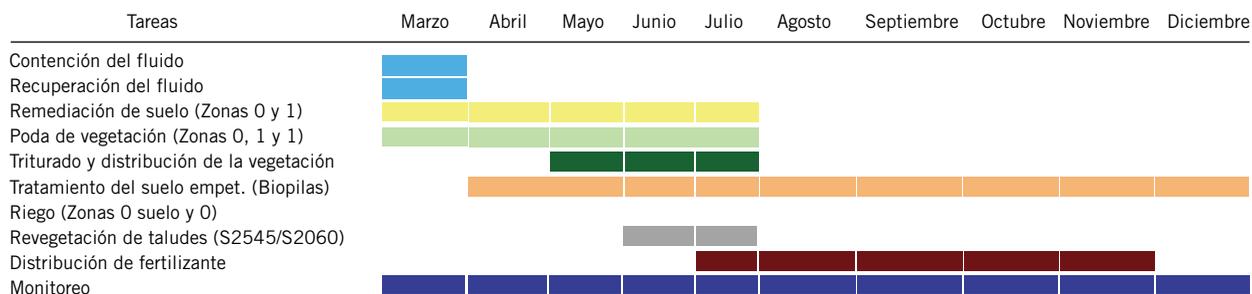
1.3.1. Contención

A raíz del escurrimiento del petróleo por caminos y picadas, y del *spray*, que se depositó sobre el campo por el efecto del viento, se decidió, de forma inmediata, dar el primer paso existente en una contingencia: la implementación de métodos de contención del fluido que permitirán minimizar la afectación del medio.

El propósito de esta etapa es el de disminuir el área total involucrada por el derrame y asegurar la protección del mallín, el ambiente de mayor sensibilidad del área.

Para ello, se procedió a la construcción de piletas de contingencia en lugares estratégicamente seleccionados respecto de la ubicación de los caminos y la morfología del terreno que contemplen los drenajes naturales. Se uti-

Cronograma cumplido.



lizó una retroexcavadora para los movimientos de suelo asociados y la terminación de las piletas.

Esta etapa fue iniciada desde el momento en que se detectó la contingencia. El día del evento fueron construidos tres piletines de contención primaria en los alrededores de la locación. Se realizaron las obras civiles de emergencia correspondientes con el fin de canalizar el fluido hacia los piletines y hacia una depresión del terreno, anti-gua pileta saneada, que también actuó como contención del líquido derramado.

Adicionalmente, se realizaron cordones y diques de tierra para evitar el escurrimiento del petróleo hacia lugares de alta sensibilidad como son mallines y aguadas.

Una vez asegurada la contención primaria del derrame, mediante los piletines, y controlada la fuente, se realizó un análisis global de la red de drenaje de la zona de influencia directa e indirecta, con el objetivo de prevenir la escorrentía del agua pluvial (potencialmente afectada por el hidrocarburo) y lograr su contención, para que no alcance el mallín. El análisis contempló distintos escenarios de precipitaciones, en función del historial climático de la zona. Como resultado de dicha evaluación, se construyeron cuatro nuevas piletas de contención adicionales. Estas piletas se encuentran impermeabilizadas con membrana plástica (polietileno de alta densidad) de 800 micrones de espesor y presentan un mecanismo de evacuación (sifón) que previene que el eventual hidrocarburo que pudiera alcanzarlas sea vertido al campo. Dicho mecanismo ha sido probado mediante la utilización de agua dulce. Por otro lado, tienen instaladas redes antiaves, para evitar que las aves de la zona puedan entrar en contacto con el fluido potencialmente contenido.



Vista de una de las piletas de contención secundaria construidas.

1.3.2. Recuperación

Para la recuperación del petróleo contenido en los piletines y piletas se utilizaron camiones de vacío y alto vacío. El fluido fue extraído de los sitios de contención, desde el mismo día del evento, y trasladado a la planta central de tratamiento del yacimiento para su procesamiento y su incorporación al circuito normal de producción.

En los últimos días de recuperación, en algunos sitios puntuales y con el objeto de aumentar la recuperación de fluido derramado, se favoreció el escurrimiento hacia los piletines mediante el uso de agua caliente.

En total, se recuperaron 2651 m³ de fluido con un 92% de agua, en promedio. Dicha etapa se extendió a lo largo de 18 días.

1.3.3. Limpieza y remediación

Las tareas de limpieza y remediación fueron planificadas e iniciadas de acuerdo a la sectorización e identificación de prioridades de intervención, surgidas del estudio de caracterización inicial realizado. Por lo tanto, comenzaron en el sector 0 (prioridad de intervención inmediata) y prosiguieron en el sector 1 (prioridad de intervención intermedia). Una vez finalizadas las tareas en dichos sectores, se procedió a realizar las tareas de remediación menores, necesarias en el sector 2 (prioridad de intervención baja).

Con la finalidad de no provocar mayor daño al ya originado, se maximizó el trabajo manual en esta etapa. Por ello se contrató una gran cantidad de personal para la realización de estas tareas. En el pico intensivo de actividad, llegaron a trabajar más de 80 operarios.

Dicha subetapa incluyó las siguientes tareas:

1.3.3.1. Remoción manual y mecánica del suelo afectado y traslado al repositorio

En forma previa al comienzo de dicha tarea, se realizaron calicatas representativas en los distintos sectores involucrados por el derrame, incluyendo el sector de mayor afectación. Como resultado se observó, ya sea por los métodos analíticos como por las características organolépticas de los materiales, que la profundidad de infiltración del fluido derramado en el suelo en ningún momento superó los 20 cm de profundidad. Se tomaron muestras de suelo, que fueron remitidas al laboratorio para su análisis. El objetivo de dicho muestreo fue, por un lado, realizar una caracterización del suelo afectado y, por el otro, determinar la profundidad máxima del suelo que debía removerse, para no remover y alterar el suelo no afectado.



Calicata construida para medir la profundidad de infiltración del petróleo derramado.

Las cuadrillas de operarios removieron el suelo en los sectores de mayor impregnación, mediante rastrillos y palas, para luego ser transportado en carretillas hasta los sitios de acopio temporarios seleccionados (sitios ya impactados, como riberas de caminos). Con posterioridad y, en forma diaria, una retroexcavadora cargaba el suelo empetrolado en un camión volcador, mediante el cual el residuo era transportado hacia el repositorio construido para luego efectuar allí su tratamiento biológico. Esta logística de almacenamiento y transporte fue planificada cuidadosamente para evitar las acumulaciones del residuo en lugares sin contención.

Vale destacar que las tareas de remoción de suelo se llevaron a cabo sólo en el sector 0. En el sector 1 no se realizó extracción de suelo empetrolado dado que sólo la vegetación presentaba una pequeña capa de *spray*, por lo cual la vegetación actuó de reparo del petróleo al suelo. Sólo se realizó el rastrillado del suelo con el fin de aumentar su oxigenación. Asimismo, en el sector 2 no se consideró necesario retirar suelo dado que no se vio afectado por el *spray* de hidrocarburo proveniente de la surgencia.

La remoción mecánica sólo se realizó para la limpieza de la locación del pozo originario de la surgencia, mediante retroexcavadora y palas cargadoras. En primer lugar, se retiraron los áridos limpios que habían sido depositados sobre la superficie misma de la locación para realizar las tareas de control del evento en forma segura y, con posterioridad, se removió el suelo impregnado con hidrocarburo y se lo transportó, mediante camión volcador, hacia el repositorio para su posterior tratamiento. De la misma forma, se procedió con el talud en la parte este de la locación.

1.3.3.2. Poda selectiva de la vegetación afectada

En primer lugar, se realizó un diagnóstico botánico de campo con el fin de identificar las especies vegetales afectadas. Las especies identificadas en mayor proporción fueron:

- Duraznillo (*Coliguaja integerrima*)
- Malaspina (*Retanilla patagónica*)
- Calafate (*Berberis heterophilla*)
- Molle (*Schinus jhonstonii*)

Otras especies identificadas (con un menor porcentaje de afectación):

- Botón de oro (*Grindellia chilensis*)
- Coirón llama (*Stipa humilis*)
- Tomillo (*Acantolipphia seriphoides*)

Según la evaluación de la afectación de la vegetación y analizando su tiempo de crecimiento, se diseñó un procedimiento de poda selectiva, con el objetivo de tratar de priorizar el rescate de las especies que presentan un mayor tiempo de crecimiento. Por lo tanto, los ejemplares de dichas especies (malaspina y molle) no fueron podados ni removidos del lugar, aún presentando distintos grados de afectación. Se evaluó y monitoreó luego su recuperación natural en el tiempo. En cambio, el resto de las especies con mayor posibilidad de regeneración, que presentaban afectación intermedia y alta, fueron podadas con el fin de permitir su rápido rebrote. En ningún momento los ejemplares fueron extraídos desde su raíz.

Por otro lado, la poda se realizó en forma parcial, se removieron sólo aquellas ramas que presentaban afectación por hidrocarburo, con el fin de priorizar y maximizar la conservación de los ejemplares vegetales. Dicha poda se realizó en forma manual mediante tijeras podadoras.

Las ramas cortadas se fueron colocando en bolsones, para luego ser transportadas a los sitios de acopio temporarios mediante retroexcavadora.



Cuadrilla trabajando en la poda y recolección de vegetación impactada por el *spray* de hidrocarburo.

Vale destacar que en todo momento las tareas manuales de limpieza y de remediación fueron ejecutadas desde los sitios más altos hacia los más bajos de los taludes, así como en sentido oeste-este (dentro de cada zona), con el fin de proteger a los operarios del viento. La empresa impartió charlas de seguridad a dicho personal para que pudieran realizar los trabajos en forma segura, siguiendo los procedimientos establecidos y utilizando los correspondientes elementos de protección personal.

Con posterioridad, todas las ramas cortadas fueron sometidas al proceso de triturado con el objetivo de disminuir su volumen y facilitar las tareas de tratamiento y disposición final, diseñado para cada corriente. Dicho proceso se realizó mediante una máquina trituradora de ramas contratada para tal fin.

Dicha máquina posee las especificaciones que se muestran en la tabla de página 68.

| | |
|--------------------------|--|
| Capacidad | Ramas de hasta 110 mm de diámetro. |
| Acoplado | Base con chapa de acero plegada en "U", con travesaños y refuerzos soldados, eje rígido de 2" con rodado tipo <i>Pick-Up</i> . |
| Alimentación | Motor diésel, 4 tiempos, 6 cilindros, con arranque eléctrico. |
| Equipo triturador | Transmisión por autoembrague centrífugo, rotor de acero forjado con 4 cuchillas de corte de espesor de 3/8". |



Trituradora utilizada en el tratamiento de los residuos de poda.

Previamente, se realizó una clasificación de las ramas cortadas, según el grado de hidrocarburo que contenían. Dicha clasificación tuvo como objetivo principal definir el método de disposición final más adecuado de cada corriente proveniente del producto de la trituración. A continuación, se detallan los distintos tipos de disposición final implementados:

1.3.3.2.1. Disposición final del producto triturado proveniente de las ramas con mayor contenido de hidrocarburo (ramas retiradas del sector 0): dicha corriente fue sometida a un proceso de incineración. La incineración se realizó en el horno pirolítico que posee la empresa en el yacimiento (horno Hoval MZ7, con capacidad de 700 kg/d).

1.3.3.2.2. Disposición final del producto triturado proveniente de las ramas con contenido medio de hidrocarburo (ramas retiradas del sector 1): el material triturado con contenido medio de hidrocarburo se reincorporó al suelo de la zona



Hormigonera donde se realizó el lavado en caliente y con detergente biodegradable del material triturado con presencia de hidrocarburo.

involucrada, previo lavado para remover las trazas de hidrocarburo presentes en él. El objetivo fue devolver al ecosistema la biomasa removida como material orgánico que se incorpora al suelo natural.

Se realizó el lavado de la vegetación triturada en una hormigonera, a la que se le incorporó agua caliente y un detergente biodegradable que facilitara el desprendimiento del hidrocarburo presente. Los resultados fueron muy exitosos en cuanto a su remoción, por lo que se convirtió en una metodología novedosa y eficaz para la zona.

El efluente líquido resultante del lavado fue reincorporado al circuito de reinyección del yacimiento.

1.3.3.2.3. Disposición final del producto triturado proveniente de las ramas con contenido bajo de hidrocarburo (ramas retiradas del sector 2): se realizó mediante la reincorporación al suelo de la zona involucrada. La idea nuevamente era devolver al ecosistema la biomasa removida, como material orgánico que se incorpora al suelo natural.

Debido al bajo contenido de hidrocarburo presente en estas ramas, sumado al proceso de triturado, el cual drenó parte de dicho contenido, no resultó necesario realizar la etapa de lavado para dicha corriente. Las ramas se dispusieron sobre taludes, en algunos casos, mezcladas con tierra vegetal.

1.3.3.3. Encapsulado del hidrocarburo mediante producto absorbente orgánico

En aquellos sitios puntuales donde persistió una capa de hidrocarburo sobrenadante que no pudo ser recuperada mediante el camión de vacío, se esparció un producto absorbente orgánico, y se lo mezcló con el terreno, con el fin de encapsular el hidrocarburo por contacto y evitar su migración. Luego de varios días de laboreo manual, la mezcla fue llevada al repositorio para que complete su biodegradación allí, lo que dejó al suelo limpio y libre del contaminante.

Dicho producto absorbente resulta natural ya que es un derivado de la turba extraída en la zona de la localidad de El Hoyo, provincia del Chubut. Su estructura porosa le permite encapsular el hidrocarburo por contacto.

En total, se utilizaron unas 240 bolsas de este producto, lo que equivale a 20,5 m³ (3600 kg) de producto esparcido.

Los resultados de remoción del hidrocarburo, mediante el uso de esta metodología, fueron óptimos.

1.3.4. Tratamiento y disposición final de los sólidos empetrolados

El propósito de realizar el tratamiento de los suelos que presentaban un mayor contenido de hidrocarburos y que fueron removidos del área involucrada fue obtener un residuo inertizado, dentro de especificaciones, y apto para su disposición final.

Se identificó la necesidad de construir un repositorio específico para realizar el tratamiento de esta corriente de

residuos, sin comprometer la normal operación del yacimiento y su sistema de gestión integral de residuos ya implementado. Se realizó un análisis de alternativas, y, finalmente, se seleccionó la locación de un pozo abandonado.

Las razones por las cuales ha sido seleccionado dicho sitio fueron:

- La zona tenía un suelo que presentaba características arcillosas y de alta impermeabilidad natural, así lo indicaba el perfil estratigráfico que surgía de la perforación de un freático.
- El área ya estaba intervenida, por lo que no era necesario realizar tareas de deforestación ni desmalezamiento, de esta forma se evitaba la afectación sobre la vegetación.
- En la zona ya existía una depresión natural, por lo que se minimizó el movimiento de suelos, para permitir la construcción de las piletas de almacenamiento temporario de los residuos.

En dicho repositorio fueron construidas dos piletas de almacenamiento temporario de los suelos empetrolados, de 1000 m³ y 1300 m³ de capacidad respectivamente.

Se instalaron sendas membranas impermeabilizantes de polietileno de alta densidad, de 800 micrones de espesor (DIN:16776-PE,EACL,35 Bis 40T), con el objetivo de evitar el lixiviado del residuo. En la misma locación, se realizó el tratamiento biológico del suelo empetrolado. Dicho predio fue señalizado como así también cercado para evitar la entrada de animales.

Además, se realizó un muestreo inicial del suelo del repositorio, con el fin de establecer una línea base de la calidad del suelo para luego, una vez finalizado el tratamiento, evaluar y verificar que este no haya sido afectado. Los parámetros analizados fueron: HTP, conductividad, RAS (relación de absorción de sodio) y CIC (capacidad de intercambio catiónico).

1.3.4.1. Descripción del proceso de tratamiento

El método de tratamiento seleccionado es un tratamiento biológico; entre las ventajas que este posee, se destaca la de ser un proceso completamente natural y que logra una remoción completa del hidrocarburo (hasta valores por debajo de los límites permisibles), sin dejar pasivos ambientales.

El uso de microorganismos especiales para la degradación de la materia orgánica no es más que la aceleración del proceso que la naturaleza realiza constantemente.

Se realizó una biorremediación acelerada del residuo mediante biopilas. El proceso consiste en la aplicación sistemática de bacterias aeróbicas, anaeróbicas y facultativas junto con tensoactivos, enzimas y nutrientes de fermentación específicos para las concentraciones de hidrocarburos presentes en el suelo a tratar.

Para determinar la fórmula más eficaz del producto a utilizar para la biodegradación, se tomó una muestra del residuo y se derivó al laboratorio de la empresa encargada de realizar el tratamiento, donde fue inoculada con distintos productos, se realizó una respirometría de 72 horas a fin de determinar la mejor curva de degradación posible, de acuerdo a los contaminantes hallados y a la concentración de estos. Fue determinado el contenido de TPH,

el porcentaje de aromáticos, el porcentaje de alifáticos, el porcentaje de asfálticos, contenido de P, N y micronutrientes, para definir los productos más eficaces para utilizar en la preparación del inóculo para realizar el saneamiento.

Existen, de acuerdo a las concentraciones y tipos de contaminantes presentes, distintas sinergias de microorganismos, enzimas y nutrientes que aseguran una mayor hidrólisis y, por lo tanto, una mayor posibilidad de crecimiento de biomasa específica, lo que acelera hasta cien veces los tiempos de degradación naturales.

Todos los cultivos de microorganismos utilizados son de procedencia local y poseen sus estudios ecotoxicológicos correspondientes. Presentan la característica fundamental de poseer una buena *performance* de degradación aún en bajas temperaturas (hasta -4 °C), a diferencia de los microorganismos mesófilos indígenas, lo cual asegura la continuidad del tratamiento durante el invierno. Esto fue un factor fundamental analizado a la hora de decidir el tratamiento a utilizar, ya que gran parte de la remediación del derrame y el tratamiento de los sólidos recayó en la época invernal.

Como en todo proceso biológico, existieron algunos factores limitantes para el tratamiento:

Oxígeno: es el factor limitante para la vida microbiana.

Se lo obtuvo mediante la aireación mecánica del material empetrolado.

Nutrientes y micronutrientes: son esenciales para el crecimiento bacteriano. El N, el P y los micronutrientes son agregados al residuo junto con los cultivos bacterianos y de acuerdo a las necesidades detectadas en la caracterización inicial del residuo y al seguimiento analítico del proceso, lo que asegura su óptimo rendimiento.

Humedad: se debe mantener en el rango 20% - 60%. Se logró mediante el regado del material.

pH: rango óptimo 6-9.

El tratamiento se inició mediante la construcción de las biopilas de 3 m de ancho por 1,5 m de alto, por el largo que permitió la locación del repositorio.

Luego, se realizó la aplicación sistemática de las bacterias aeróbicas, anaeróbicas y facultativas junto con enzimas y nutrientes en el residuo, mediante el regado a través



Vista de las biopilas en el repositorio.

de un camión regador (al agua del camión se le mezcló el producto específico necesario para la biodegradación).

Con posterioridad a la inoculación, se realizó el mezclado, homogeneización y aireación del residuo en forma mecánica (mediante una motoniveladora).

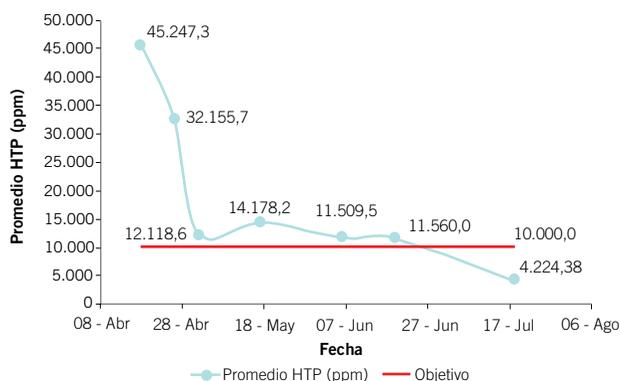
Esta operación de inoculación más mezclado se repitió cuatro veces, con frecuencia semanal. De esta manera, se permite que, entre riego y riego, se desarrolle la colonia microbiana y se alcancen óptimos valores de degradación del hidrocarburo presente en el residuo.

Luego de la aplicación de las inoculaciones a todas las biopilas del repositorio, y en función de los resultados obtenidos en el seguimiento de la reducción de hidrocarburos totales de petróleo en el residuo, se comenzó con la aplicación de riegos diferenciados que se caracterizan por la incorporación de microorganismos de baja temperatura y su respectivo balance nutricional. Se consideró que si bien los valores medidos ya se encontraban cercanos al valor objetivo, era necesario un refuerzo de la población bacteriana para asegurar resultados definitivos.

Con posterioridad a las tareas de inoculación, se alcanzó una presencia microbiana tal que no fue necesaria la nueva incorporación del producto, por lo que solo restó el control de los factores limitantes para el tratamiento, detallados anteriormente, para permitir que la degradación del hidrocarburo continúe con éxito hasta alcanzar los valores deseados.

A lo largo del tratamiento, se realizaron muestreos del residuo para realizar el monitoreo de su evolución y determinar las correcciones necesarias a ejecutar que hicieran eficiente la biodegradación del hidrocarburo.

A continuación se muestra la evolución del contenido de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en los sólidos tratados en el repositorio, medidos según la técnica EPA 418.1.:



En total, se trataron 3500 m³ de suelo empetrolado. Al cabo de 14 semanas de tratamiento, el material presentaba una concentración de HTP apta para su disposición final.

La disposición final de los residuos tratados, dentro de especificaciones, se realizó en la locación de un pozo aledaño, con la finalidad de lograr la revegetación del talud (favorecido por el gran contenido de nutrientes que posee el suelo ya inertizado) y así prevenir la erosión de dicho talud.

1.3.5. Restauración ambiental

El propósito de esta etapa fue restaurar las condiciones originales (predisturbio) de la zona involucrada por el

derrame y así recuperar la estructura original del suelo y la vegetación.

Para ello se aplicaron las siguientes técnicas:

1.3.5.1. Estabilización de taludes

Si bien sólo resultó necesaria en algunos sitios puntuales, en forma previa a las tareas propias de la restauración, se realizaron obras civiles de estabilización de taludes necesarias para controlar la erosión del terreno. Esto incluyó pequeños movimientos de suelo para la restauración del perfil de taludes, de locaciones y del terreno natural.

1.3.5.2. Distribución de top-soil

En aquellas zonas donde los suelos resultaron más afectados, se colocó *top-soil* (capa de suelo orgánica), con el agregado de nutrientes específicos sumado al producto obtenido del triturado de las ramas removidas durante la etapa de limpieza (por su aporte de materia orgánica al suelo).

En forma predominante, se esparció el *top-soil* en los taludes ya que son zonas de mayor dificultad para la revegetación con elevadas pendientes y exposición a los vientos (secado y voladuras).

1.3.5.3. Acondicionamiento del terreno: microrelieves

La finalidad del acondicionamiento del terreno es dejarlo en las óptimas condiciones para que se favorezca el restablecimiento natural de la vegetación o de las tareas de plantación o siembra. Por lo tanto, las prácticas están orientadas a mejorar la dinámica del agua en el sitio, lo que aumenta la infiltración y disminuye la escorrentía. De esta forma se contribuye a la mitigación de los procesos erosivos.

En este caso, la técnica aplicada fue la conformación de microrelieves en los taludes. Consiste en la ejecución de pequeños hoyos de aproximadamente 0,40 m de diámetro, a contrapendiente y en forma intercalada. Es una tarea que se realiza una vez distribuido el *top-soil* con el fin de reducir la velocidad de la escorrentía y favorecer la revegetación debido a que retiene partículas de suelo, semillas diseminadas por el viento y recolectar humedad de lluvia o riego, lo que genera "pequeños microclimas" favorables para la revegetación natural.

1.3.5.4. Revegetación con especies autóctonas

En los taludes de la locación del pozo donde se originó la surgencia y en taludes aledaños, así como en algunos



Tareas de conformación de microrelieves y plantación de ejemplares arbustivos autóctonos.

sectores de suelo desnudo, se realizó la revegetación asistida mediante la plantación de ejemplares arbustivos autóctonos desarrollados en los tres viveros propios que posee la empresa en el yacimiento. En función de la dificultad potencial del prendimiento de los plantines en cada sector, se combinó esta tarea con la previa distribución de *top-soil* y conformación de microrrelieves, y el posterior agregado de nutrientes e instalación de sistemas de riego.

1.3.5.5. Fertilización

La fertilización se realizó, en su mayoría, de manera inmediata al inicio de las tareas de remediación, para aprovechar su disolución por efecto de la humedad del invierno y para que los nutrientes estén disponibles en el suelo para la siguiente primavera o en eventuales rebrotes otoñales tardíos (en el caso de temperaturas moderadas).

Se aplicó fertilizante tanto en suelos desnudos (taludes y sectores de mayor impacto) como en aquellos que presentaban arbustivas en pie a las que se les realizó una poda, retiro parcial del suelo o remoción con rastrillo. Implicó el sector 0 y el sector 1, y en menor medida y forma selectiva el sector 2.

Con la poda de la vegetación, se redujo inevitablemente sus reservas, por lo tanto, con la fertilización se contribuyó a recuperar esas reservas y la capacidad de rebrote (reconstitución de tejidos) de los ejemplares vegetales. Simultáneamente, la fertilización tiene efectos positivos para la flora bacteriana del suelo que puede degradar los vestigios de hidrocarburos que pudieron haber quedado en las tareas de limpieza.

La aplicación de fertilizante se realizó con una composición NPK de 15% en cada uno de sus elementos. Una primera dosis se aplicó en forma inmediata antes de que el suelo se empezara a congelar por el invierno, de manera tal que se pudiera disolver e incorporar a este. La segunda dosis se realizó en primavera (temprana) para completar la dosificación. No se aplicaron ambas dosis juntas ya que los nutrientes que no pueden ser incorporados, se lixivian o inertizan.

La forma de aplicación elegida fue manual. La dosis aplicada fue de 150 kg por hectárea. Se utilizó un total de 5250 kg de fertilizante para la primera dosis y una cantidad idéntica para la segunda.

1.3.5.6. Resiembra

Se implementó la resiembra con semillas de especies anuales introducidas, de ciclo otoño-invierno y de rápida germinación. Se aplicó en las zonas planas de suelo desnudo, principalmente en las zonas bajas del sector 0 y, selectivamente, en los sectores 1 y 2, priorizando las zonas con baja densidad de población arbustiva. De esta forma, se refuerza el desarrollo y recupero de la vegetación por el establecimiento de mayor cantidad de ejemplares.

1.3.5.7. Instalación de sistema de riego

Con el fin de permitir el rápido crecimiento de la vegetación transplantada y de las semillas sembradas, y así evitar el proceso de desertificación causado por la erosión (tanto eólica como hídrica), se implementó un sistema de riego en la zona. Se instaló un tanque elevado de agua dulce para distribuir el agua hacia los sitios que requerían restauración.

Se implementaron dos sistemas de riego:

1.3.5.7.1. Riego por goteo

Esta metodología fue utilizada para el riego de los taludes más afectados. A los efectos del cálculo, fue considerada una locación de 130 m de largo con una pendiente de 40 m de longitud, lo que equivale a 5200 m².

No fue necesaria una bomba debido a que la presión por el desnivel entre el tanque de abastecimiento de agua dulce y los taludes fue suficiente para el correcto funcionamiento de los equipos seleccionados.

Se utilizaron los siguientes materiales:

Materiales utilizados

| | |
|-------------------|---|
| Manguera de riego | Autocompensada; de diámetro 17 mm y 1 mm de espesor; con goteros de 1,6 l/h insertados y separados 1 m. |
| Caño | PVC; conformando la parrilla. |
| Cabezal de riego | Válvulas, manómetro, canilla para limpieza de filtro. |
| Filtro | De anilla de 1,5". |
| Electro-válvulas | DC de 1,5". |
| Programador | DC de 3 programas. |
| Accesorios | PVC y PE para las cañerías. |

El cálculo de los consumos de agua se realizó aplicando una lámina de 3 mm diaria de riego, para una superficie de 5200 m², lo que dio como resultado 15,6 m³/día. Debido a que el equipo eroga aproximadamente 8,3 m³/h se optó por programar en dos horas diarias. Regando ambas locaciones de aproximadamente igual superficie, el consumo total fue alrededor de 30 m³ entre ambas. Cabe destacar que el cálculo se realizó para riego entre los meses de diciembre y marzo, época veraniega y de altas temperaturas. Fuera de este período, el riego fue menor.

1.3.5.7.2. Riego por aspersión

El riego por aspersión fue seleccionado para aplicar en los sectores afectados más bajos. En estos sitios, indefectiblemente, fue necesaria la colocación de una bomba en función del radio de riego de los aspersores y los caudales.

El cálculo del riego se hizo también sobre una base de una lámina diaria de 3 mm. Se seleccionaron aspersores a martillo montados sobre una línea de conducción de PVC de diámetro 40". Los aspersores tienen un diámetro de cobertura de 25 m y erogan 1035 l/h a 3 kg de presión.



Sistema de riego por aspersión instalado.

Dicha presión fue aportada por el desnivel que existe desde el tanque de 40 m³ instalado a tal efecto.

Cada sector a regar fue provisto de una válvula de corte de 2" en el final del caño de alimentación de *tubing*, que debió construirse desde el tanque hasta las diferentes zonas. A partir de esa válvula, se tendió la cañería de PVC sobre la cual se montan los aspersores cada 10 m para lograr un buen solape, cada uno con su correspondiente válvula.

Se montaron en total 40 aspersores con las correspondientes válvulas y *fittings* de PVC y polipropileno.

1.3.6. Monitoreo

El propósito de esta etapa fue analizar la evolución de la recuperación del área afectada por el evento. Se inició en forma inmediata al derrame y se prolongó hasta la fase de posremediación, que incluye el trabajo final de caracterización del área realizado con la universidad local.

Se realizó el monitoreo y análisis del suelo involucrado (in situ), monitoreo de la evolución de la vegetación; el monitoreo y análisis de los sólidos tratados en el repositorio, previo a su disposición final, y la construcción de cinco freáticos para asegurar que la napa freática no haya sido afectada.

A continuación, se presenta un detalle de dicho plan de monitoreo:

1.3.6.1. Monitoreo del suelo y la vegetación (in-situ)

En primer lugar, se llevó a cabo la caracterización inicial de la afectación del suelo y la vegetación in situ. Se realizó el relevamiento visual y el muestreo inicial en las distintas zonas afectadas de los tres sectores identificados, lo que permitiría analizar su evolución luego de las tareas de limpieza y remediación. Con ello se determinó la ubicación adecuada de los puntos de muestreo de suelo y vegetación.

Se realizaron 56 sondeos de suelo, de los cuales se seleccionaron 31 sitios distribuidos uniformemente en las tres zonas para la extracción de muestras que se enviaron a un laboratorio para su análisis. Se ubicaron diez puntos de muestreo por cada zona de afectación, y un punto considerado *background* en un sector no afectado. Todos los puntos fueron georeferenciados.

Además, se seleccionaron 14 puntos de muestreo para la caracterización de la vegetación, incluyendo un punto ubicado en la zona no afectada.

Los sondeos se realizaron con pala manual para alcanzar el suelo limpio, observando el tipo de sedimento atravesado. Se realizó un detalle y descripción de cada sondeo. En los puntos ubicados en el sector de mayor impacto, se tomaron muestras de suelo a profundidad de 0,30 m y superficial. En los demás puntos, sólo se tomaron muestras superficiales. Para la extracción de las muestras, se siguió lo establecido en la norma EPA SW 846, y para su conservación y transporte, se respetaron los requerimientos establecidos, y se registraron las cadenas de custodia de cada muestra.

El total de las muestras de suelo y vegetación fue sometido a la determinación de HTP (método analítico EPA 418.1) y conductividad (SM 2510-B). Doce muestras fueron seleccionadas, además, en el momento del muestreo para realizar la determinación de BTEX (EPA 8260). Luego de obtenidos los resultados de HTP se seleccionaron aque-

llas 15 muestras que presentaron los valores más elevados de HTP y se determinó el contenido de PAH y fenoles (EPA 8270). A cinco de ellas también se les practicó la determinación de PAH y fenoles sobre lixiviado.

Los resultados de la caracterización mostraron que el sector 0, valorado como de impacto severo, en general presentó valores de THP superiores a los 10000 mg/kg, valores que fueron más elevados en función de la cercanía al pozo originario del derrame. Sin embargo, la elevada concentración no superó los primeros 20 cm superficiales del suelo. En los otros sectores, no superó el límite permisible.

En cuanto al contenido de BTEX, si bien en dos muestras se detectaron valores significativos, todas presentaron valores por debajo de los niveles de referencia adoptados.

La muestra *background* se encontraba por debajo de los límites de cuantificación de los métodos analíticos.

No se detectaron contenidos de PAH ni fenoles.

Las muestras de vegetación presentaron: en dos casos valores del 40% de THP (sector 0), entre 1 y 25% de THP en siete muestras (sector 0 y 1) y un valor promedio de 1,5% en el resto de las muestras (sector 2); la muestra *background* presentó 0,5% de HTP.

Los resultados de la caracterización inicial fueron considerados para determinar las acciones más eficaces a ser llevadas a cabo durante la implementación del plan de remediación ambiental. Además, permitió ajustar la zonificación de las prioridades de intervención.

Finalmente, transcurrido un año de la contingencia, se realizó la caracterización final de la superficie afectada por el derrame. Para ello se tomaron 29 muestras de suelo. Además de la toma de muestras, se realizó una descripción de la vegetación en cada sitio seleccionado.

Las muestras fueron trasladadas a un laboratorio para su análisis y determinación de los siguientes parámetros: HTP, composición porcentual de componentes alifáticos, aromáticos, polares y asfaltenos, composición porcentual de tipos de hidrógeno según resonancia magnética nuclear, conductividad eléctrica, pH del suelo y saturación de agua. Los resultados de los análisis evidenciaron que prácticamente no quedaban rastros de contaminación en la zona, lo que corroboró el éxito de la remediación.

Adicionalmente, se realizó un ensayo de fototoxicidad utilizando las especies de interés regional *Proposis demudans* y *Atriplex lampa*, y *Lactuca sativa* (especie de control) por su sensibilidad. Estos estudios no pueden reemplazarse por análisis químicos, ya que no permiten evaluar de manera global el comportamiento de los contaminantes en el entorno. El parámetro evaluado fue el porcentaje de germinación.

En el sector 0 se realizaron 39 ensayos de germinación por triplicado, de los cuales el 77% presentó un porcentaje de germinación levemente inferior al valor del *background*. En los sectores 1 y 2 se llevaron a cabo 30 y 15 ensayos respectivamente, y se obtuvo 67% y 40% de ensayos con porcentaje levemente inferior al *background*.

1.3.6.2. Muestreo y análisis de los sólidos tratados en el repositorio previo a su disposición final

De manera adicional a la caracterización inicial del residuo presente en el repositorio y a los análisis intermedios que se realizaron durante la ejecución de la biorremediación, se realizó un análisis específico por cada volumen de suelo tratado, en forma previa a su disposición final.



Imágenes que dan cuenta de los resultados de la remediación en la zona afectada.

1.3.6.3. Muestreo y análisis de la napa freática

Se diseñó una red de freáticos en la zona, cuyo objetivo fue evaluar la calidad de agua de la napa freática y monitorear su potencial afectación. Se realizó la perforación de cinco freáticos. Para su ubicación, se realizó un análisis de la red de drenaje de la zona mediante la interpretación del mapa topográfico de la zona y sus curvas de nivel correspondientes, corroborado con el relevamiento en campo, con el fin de localizar un freático en la zona más afectada y los otros aguas arriba (como línea base) y aguas abajo del sitio donde escurrió el hidrocarburo en superficie.

Asimismo, también se consideró la conveniencia de ubicar un freático en el repositorio para monitorear la potencial afectación del recurso resultado del acopio y

tratamiento de suelos empetroados, más allá de las medidas de impermeabilización tomadas en él.

Los muestreos, la conservación de muestras y el transporte se realizaron según los requerimientos establecidos por cada uno de los métodos analíticos aplicados. Los parámetros analizados incluyeron: conductividad, HTP, pH, bario, cloruros, hierro en agua, magnesio, potasio, sodio, sulfatos, alcalinidad de carbonatos, alcalinidad de bicarbonatos, temperatura, fenoles totales, estroncio, sólidos disueltos totales, dureza permanente, DBO, DQO, metales pesados, derivados de hidrocarburos incluidos en el método analítico EPA 8015 y los del método EPA SW-846 método 8310.

Ninguna muestra indicó algún parámetro fuera de los límites permisibles, lo que permitió asegurar la ausencia

de contaminación en la napa freática y que esta no fuera impactada por el derrame.

1.3.6.4. Seguimiento del grado de restauración de la flora

Con el objetivo de poseer un método de seguimiento de los distintos tratamientos y técnicas de restauración ambiental aplicadas en la remediación, se llevó a cabo la instalación de monitores geoposicionados. Los tratamientos a monitorear fueron:

- Distintas intensidades de poda.
- Fertilización.
- Siembra de especies anuales de rápida implantación.

1.4. Resultados

Los resultados en todas las etapas de la remediación fueron muy satisfactorios. En página 78, se presentan algunas muestras fotográficas de la zona afectada, luego de concluirse la remediación.

2. Conclusiones

Sin dudas, un evento de esta magnitud deja como legado una gran cantidad de lecciones aprendidas, que sirven para continuar mejorando el desempeño ambiental en forma permanente.

En primer lugar, se deben destacar los muy buenos resultados obtenidos en cada etapa del plan de remediación ambiental implementado, lo que valió la confianza de la autoridad de aplicación que controló intensamente dicho proceso desde los inicios.

Se aplicaron tecnologías novedosas y pioneras en la cuenca del golfo San Jorge así como una combinación eficiente de técnicas ya empleadas, lo que fijó un estándar de acción a futuro para todas las operadoras.

Si bien los mayores esfuerzos en materia ambiental se deben seguir centrando en las actividades de prevención, se resaltó la importancia de reaccionar ante la contingencia de una manera rápida y eficaz, lo que demuestra una capacidad de respuesta inmediata ante este tipo de eventos. El compromiso y la seriedad de todo un equipo multidisciplinario, sumados a la transparencia y a la comunicación permanente mantenida con la autoridad de aplicación, fueron factores que contribuyeron al éxito de la remediación.

Desde el punto de vista técnico, se destacó la importancia de la planificación selectiva por etapas y por sitio. Se evaluó y analizó en detalle en cada sitio afectado, cuál era la mejor alternativa para remediar la afectación y, conforme a dicho análisis, se tradujo en acción. La sectorización inicial realizada fue clave para el éxito de la remediación. El tiempo supuestamente "perdido" en la etapa de caracterización resulta tiempo "ganado" al final de la remediación.

Por otro lado, fue fundamental el diagnóstico inicial de especies vegetales afectadas y la poda selectiva conforme al tipo de especie y su tiempo de crecimiento. La respuesta de la vegetación fue muy buena, incluso superó las expectativas más optimistas, debido a que a los pocos meses del derrame, ya se pudo observar el rebrote. Fue clave también el aporte de los fertilizantes y del riego con

el fin de incentivar y acelerar dicho rebrote.

La construcción de las piletas adicionales de contención, realizadas según el estudio de drenaje de la zona, fue importante para preservar el ambiente más sensible del yacimiento, como resulta el mallín. Dicha acción adquiere una mayor relevancia ya que al asegurar que el fluido no haya alcanzado el mallín, se impidió que la napa freática del yacimiento fuera afectada.

El producto absorbente orgánico, utilizado para inmovilizar el hidrocarburo en zonas de difícil acceso, demostró buenos resultados en su aplicación a mayor escala, por lo que fue una alternativa válida para su utilización a futuro.

El proceso de triturado de las ramas podadas así como el lavado con detergente biodegradable de las ramas con mediano contenido de hidrocarburo demostraron ser procesos útiles a los efectos de la remediación ambiental. El disponer el producto proveniente del triturado sobre los taludes del yacimiento resultó fundamental para disminuir al máximo la biomasa removida de la zona afectada. Por otro lado, como efecto secundario, contribuyó a la estabilización de los taludes para prevenir la erosión tan característica en la zona.

Uno de los aspectos fundamentales que contribuyeron al éxito de la remediación, sin dudas, fue que se priorizó en todo momento el trabajo manual. Al realizar el rastillaje del suelo y, principalmente, la poda de las especies vegetales, en forma manual, se contribuyó a minimizar la afectación causada por la contingencia.

Para terminar, vale destacar dos aspectos ocurridos durante el proceso de la remediación. El primero es que no se registraron accidentes con el consiguiente tiempo perdido ni accidentes registrables durante la ejecución de las tareas, lo que demuestra la gran concientización en materia de seguridad con la cual se trabajó. El otro resulta ser la importancia de la comunicación interna y el trabajo en equipo, lo que permitió la asignación de recursos en forma rápida y ordenada de manera permanente.

Más allá de los buenos resultados obtenidos, el deseo de los autores del presente trabajo es que las experiencias descriptas no resulten necesarias para ninguna nueva contingencia. Sería un éxito de la prevención sobre la remediación. No obstante, debido a lo dinámica y compleja que resulta la operación de un yacimiento de hidrocarburos, nunca se podrá dejar de considerar a un completo plan de contingencias y, en especial, a la capacidad de respuesta de la empresa como una prioridad ineludible. ■

3. Bibliografía

ERM, "Caracterización de la afectación del suelo somero. Área El Tordillo, Chubut", 2007.

ECOTÉCNICA (2007), "Estudio de Impacto Ambiental para la construcción de la Batería 41S, área El Tordillo, Chubut", 2007.

API, "Risk-Based Methodologies for Evaluating Petroleum Hydrocarbon Impacts at Oil and Natural Gas E&P Sites".