

DIAGNOSIS GEOHIDROLOGICA DE EFECTOS ORIGINADOS POR UN DERRAME DE PETROLEO. PARAJE LAS HORQUETAS (SANTA CRUZ). METODOLOGÍA

Jorge Fasano ⁽¹⁾, Mario A. Hernández ⁽²⁾, Pedro Molina ⁽¹⁾, José H. Ceci ⁽³⁾ y Carlos F. Scatizza ^{(2) (3)}

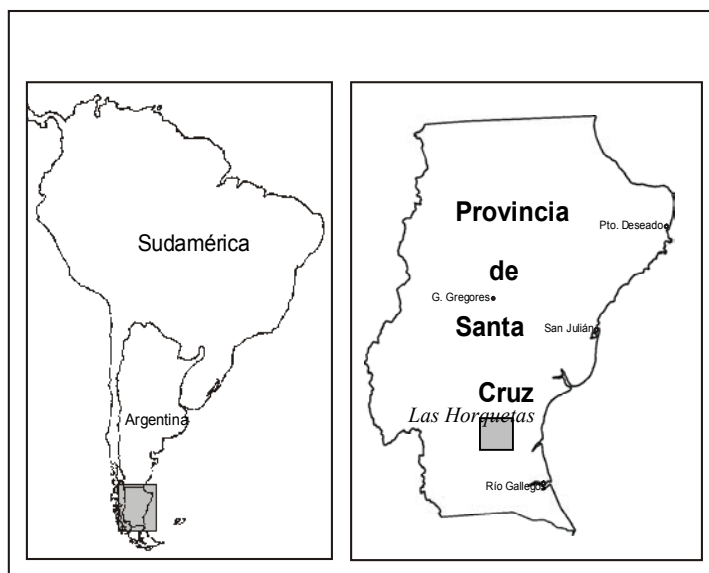
⁽¹⁾ Petrobras Energía S.A. ⁽²⁾ Universidad Nacional de La Plata ⁽³⁾ Hidroar SA

SINOPSIS

Como consecuencia de un derrame accidental de petróleo en la trampa Scrapper Las Horquetas (Oleoducto María Inés-Punta Loyola) en el Área Santa Cruz II, cubriendo una superficie de 1,8 has, se detectó la afectación a dos componentes del sistema hídrico subterráneo. Pese a la condición de permafrost de los suelos en la época del accidente, una pequeña parte del derrame accedió al subsuelo interesando a un miembro acuífero transitorio de características freáticas y otro más profundo (semilibre o semiconfinado), situación anticipada por el balance de masas a partir del volumen derramado. La metodología de estudio incluyó auscultación de gases ocluidos en la Zona No Saturada, exploración por perforaciones a ambos miembros, determinaciones analíticas (BETX, VOC's, metales pesados) en aguas subterráneas y suelos, identificación de la relación con el régimen superficial (río Coyle), ensayos hidráulicos y de recuperación de HC's, elaboraciones hidrodinámicas e hidroquímicas, interpretación, formulación del modelo conceptual del escenario físico e hidrológico y análisis de riesgos por la metodología RBCA. El despliegue metodológico y diversidad de elementos diagnósticos utilizados permitió una completa caracterización física e hidrológica del problema, proponiéndose un sistema selectivo de remediación acorde con la calificación del riesgo Clase 2 según la norma RBCA.

INTRODUCCIÓN

Un accidente acaecido en la Trampa Scrapper del oleoducto que vincula el Yacimiento María Inés con la Planta de embarque de Punta Loyola en el mes de Agosto de 2002, ocasionó un derrame de petróleo en dicho sitio, ubicado en las proximidades del Paraje Las Horquetas, Departamento Güer Aike, Provincia de Santa Cruz (Figura 1). El volumen derramado alcanzó a 927 m³, cubriendo una superficie de aproximadamente 1.8 hectáreas.



Mediante una operación de emergencia facilitada por el estado de congelamiento de los suelos, se procedió al desalojo superficial del hidrocarburo derramado y limpieza del suelo y vegetación, alcanzándose una recuperación primaria del orden de los 513 m³ de HC's y 1572 m³ de agua, añadiéndose en una segunda etapa otros 17 m³ de petróleo para totalizar 530 m³. El área fue cercada con alambrado y puesta en clausura controlada.

Al practicarse cuatro sondeos destinados a verificar el estado del sistema acuífero, pudo advertirse que en dos de ellos (PF 1 y PF 2, Figura 2) existía una Fase Líquida No Acuosa (FLNA o Fase Libre) originada por el acceso del petróleo a dos unidades acuíferas, una de carácter libre-temporaria y otra de índole semiconfinada.

Una primera aproximación al destino del excedente (397 m³) realizada por Petrobras Energía permitió advertir una significativa participación de la volatilización de las componentes livianas del producto (metano a hexano), percibida por medio de la comparación de los cromatogramas del petróleo tipo María Inés (muestra del oleoducto a la altura de la trampa) y del sobrenadante recogido en los freáticos.

Con la participación de la Empresa Hidroar SA, se desarrolló un estudio geohidrológico ambiental destinado a:

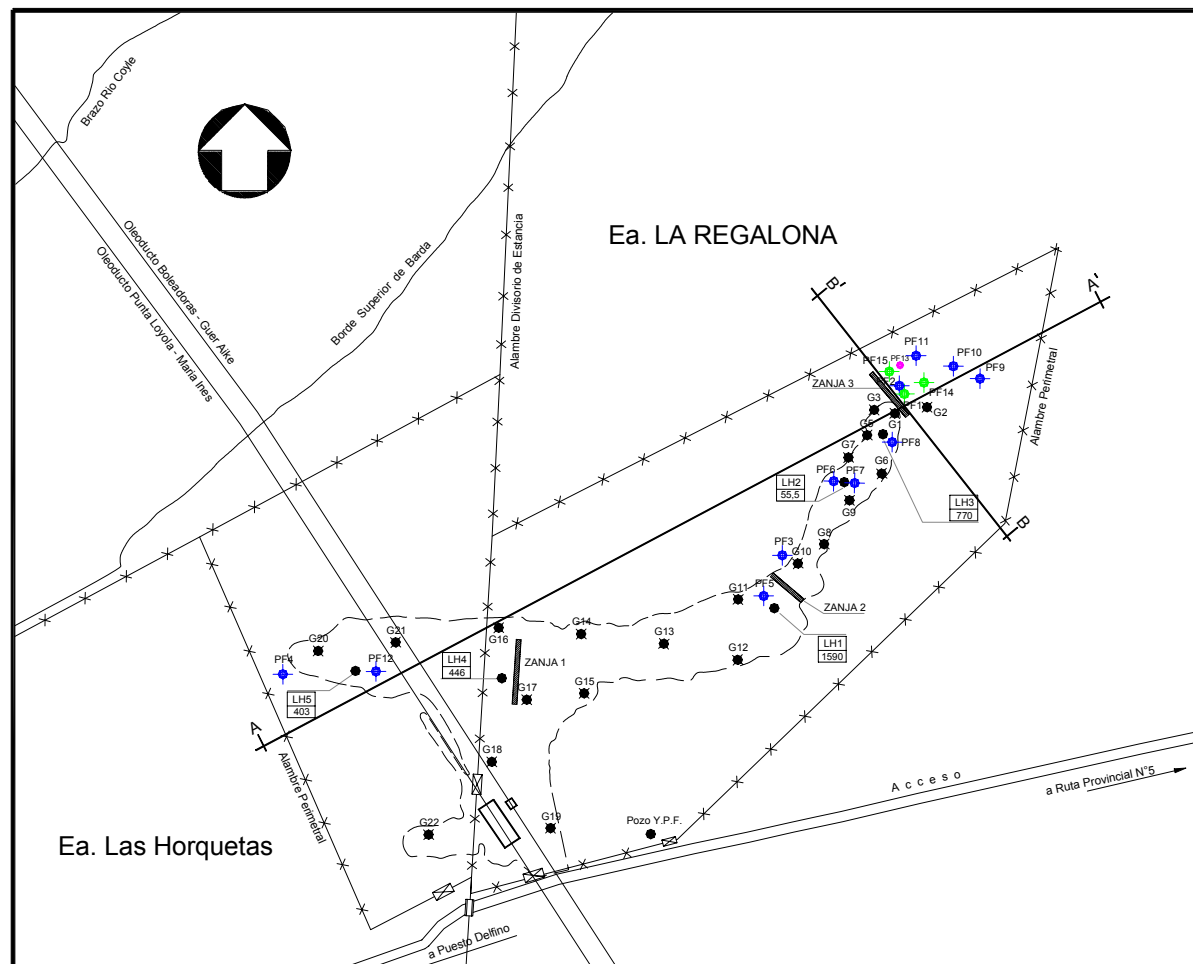
- Relevar hidrogeológicamente el sector del derrame y alrededores, estableciendo la dinámica de las aguas subterráneas, en base a una red freométrica-piezométrica emplazada "ad hoc" y ensayos para la determinación de los parámetros fundamentales.
- Identificar el/los punto/s de acceso del HC al régimen subterráneo.
- Determinar la geometría de la Fase Líquida No Acuosa (FLNA) en las unidades acuíferas superior e inferior, definir la posible dirección de migración y elaborar un pronóstico de evolución.
- Cuantificar el volumen de FLNA yacente en ambas unidades o miembros acuíferos.
- Establecer el grado actual de contaminación del agua subterránea en ambas unidades y pronosticar su evolución.
- Reconocer la relación real entre las aguas subterráneas y las superficiales (río Coyle).
- Producir una caracterización de detalle y un Análisis de Riesgos.
- Proyectar un sistema eficaz de contención del posible avance de la FLNA y remediación de las aguas subterráneas.

Se describe sintéticamente a continuación la metodología utilizada para el cumplimiento de estos objetivos.

1. METODOLOGÍA

La labor inicial consistió en la compilación de información antecedente, de por sí escasa, referida fundamentalmente a los aspectos climatológicos-hidrometeorológicos, geológicos, edafológicos, hidrológicos y ambientales.

Se realizó el reconocimiento geológico superficial y geomorfológico del área, con atención especial al valle del río Coyle, apoyado por sondeos someros para la identificación de los suelos y el posible testimonio de afectación por hidrocarburos.



REFERENCIA

- Perimetro Alambrado
- Oleoducto
- Guarda
- Tranquera

REFERENCIA TEMATICA

- Denominación de la Muestra de Suelos
(0.40 - 0.50 mbnt)
Contenido en HC Totales (mg/kg)
- G12
- Muestreo de Gases Ocultos
- Freatímetro
- Piezómetro
- Pozo Abandonado

HIDROAR S.A.	Compañía: PETROBRAS ENERGIA S.A.		
Reviso : LIC. HORACIO CECI LIC. CARLOS SCATIZZA	Proyecto : ESTUDIO HIDROGEOLOGICO, ANALISIS DE RIESGO Y PROYECTO DE REMEDIACION EN PARAJE LAS HORQUETAS - PROVINCIA DE SANTA CRUZ		
	Mapa : UBICACION DEL AREA, FREATIMETROS-PIEZOMETROS PUNTOS DE MUESTREO DE SUELOS Y GASES OCUIDOS		
hidroar@hidroar.com www.hidroar.com	Escala : 1: 10000	Archivo : UBICACION MUESTREO	Figura 2

Sobre la base de la información aportada por los primeros cuatro sondeos de exploración (tres a 8 m y el restante a 42 m de profundidad) y el relevamiento planimétrico a escala 1:5.000, fueron tomadas 28 muestras de gases ocluidos en la Zona No Saturada (ZNS) cuya distribución es mostrada en la Figura 2, procesadas cromatográficamente en el Laboratorio que dispone la Empresa en el Área, a fin de orientar la localización de las nuevas perforaciones de exploración.

Consecuentemente, se construyeron ocho perforaciones hasta 8 m de profundidad, practicadas en 6" y entubadas en 4" con tramo filtrante terminal con prefiltro de grava y acondicionadas para su ulterior empleo como monitoras. Fueron tomadas muestras de los terrenos atravesados y descriptas megascópicamente, calificándoselas desde el punto de vista organoléptico respecto a la presencia de HC's. Con esta información se confeccionaron los correspondientes perfiles integrales. Los freáticos fueron acotados topográficamente con precisión centimétrica para transformación de las profundidades medidas en alturas hidrostáticas y así poder trazar un mapa equipotencial del primer miembro acuífero localizado.

Se procedió sistemáticamente a la medición de la profundidad del nivel de agua (no se halló FLNA), toma de muestras para el análisis químico (componentes mayoritarios e indicadores de posible contaminación), ensayos hidráulicos y acondicionamiento para ser utilizados en el futuro como integrantes de una red de monitoreo. Para el muestreo de agua se utilizó un instrumental de profundidad siguiendo la norma ASTM D 4448-85a (*Standard Guide for Sampling Groundwater Monitoring Wells*). La conservación y transporte según la norma ASTM D 3325, con la correspondiente cadena de custodia.

El mapa equipotencial aludido permite identificar la dirección del flujo subterráneo, morfología de la superficie freática, medición de los gradientes hídricos y en conocimiento del coeficiente de permeabilidad y porosidad efectiva, calcular la velocidad efectiva de flujo. También la relación con las aguas superficiales y posibles variaciones areales de la permeabilidad, resultando un elemento esencial para inferir el posible desplazamiento de una fase sobrenadante y estimar la velocidad de desplazamiento.

Simultáneamente con la construcción de los pozos freáticos en la zona de derrame, se procedió a la ejecución de otros pequeños a la vera del río Coyle, con el objeto de verificar la relación existente entre el curso y las aguas subterráneas.

Las determinaciones analíticas tuvieron como objetivo por una parte, la caracterización hidroquímica del miembro acuífero (TSD, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, Calcio, Magnesio, Sodio + Potasio, Arsénico) y por otro detectar posibles contaminantes (Cadmio, Plomo, Níquel, Cinc, Mercurio, Benceno, Etil-benceno, Tolueno, Xilenos). En muestras seleccionadas además, HC's volátiles (VOCS) y semivolátiles. Durante la operación de muestreo en el campo se efectuaron determinaciones rápidas "in situ" (temperatura, conductividad eléctrica, pH). Los resultados fueron procesados en gabinete y expresados mediante diagramas estandarizados para su interpretación.

El reconocimiento incluyó la toma de muestras de suelo en posiciones seleccionadas, en función de los resultados del análisis cromatográfico de gases. La operación de recolección se ajustó a la norma *ASTM D 4700-91*, la conservación y transporte a la norma *EPA 1310*. Las determinaciones realizadas fueron de HTP y BETX.

Una labor iniciada al poco tiempo de comenzados los trabajos de campo fue el ensayo de recuperación de hidrocarburos y agua en el pozo PF 1 LH (miembro inferior), con el objeto de observar el ritmo de afluencia de los fluidos bajo bombeo y su respuesta en el PF 2 LH (miembro somero). Este ensayo fue muy importante para interpretar la posible relación entre los componentes del sistema geohidrológico y suministró, además, información acerca de la variación temporal de la relación HC/agua durante la recuperación e indirectamente, indico la posible ocurrencia del producto en el miembro inferior

Con los resultados de esta primera fase de investigación, dirigida a producir un diagnóstico sobre suelos, resto de la Zona No Saturada, río Coyle y primer miembro acuífero se orientaron las siguientes tareas.

Para reconocer el comportamiento del miembro acuífero inferior y detectar la posible ocurrencia de FLNA, se practicaron dos nuevos sondeos de exploración de 40 m de profundidad, situados en función de la información generada, especialmente la respuesta del sondeo PF 1 LH al bombeo realizado. A diferencia de este último, los nuevos pozos se ejecutaron en seco, sin inyección de agua. Se elaboró para cada uno de ellos el correspondiente perfil geológico con las muestras recuperadas y fueron entubados luego de aislar adecuadamente el primer miembro. Se procedió a medir niveles estáticos (al no detectarse FLNA), coleccionar muestras de agua para análisis químicos bajo los mismos procedimientos de norma ya descriptos, con idénticas determinaciones, y el acotamiento topográfico de la boca de pozo.

Con las alturas hidrostáticas calculadas en función de profundidad y cota, se identificó la dirección de escurrimiento. Para determinar el Coeficiente de Permeabilidad fue ejecutado un ensayo hidráulico de bombeo/recuperación, utilizando al sondeo PF 15 LH como extractor y a los denominados PF 1 LH y PF 14 LH como de observación.

La comparación de las alturas hidrostáticas en uno y otro miembro acuífero y de la dirección de flujo en cada uno de ellos, facilitó la comprensión de la relación hidráulica existente y por ende, de la posible migración del producto en el subsuelo.

Los datos generados en ambas fases dan lugar a la caracterización desde el punto de vista de la geohidrología ambiental y síntesis de los contenidos.

Una metodología que resulta adecuada y cada vez más utilizada en este estadio de un estudio ambiental vinculado a la actividad hidrocarburífera, es el Análisis de Riesgos, etapa que precede a definir la posible remediación del sitio.

Se utilizó para esta finalidad la Norma ASTM 1739/95 "*Risk-Based Corrective Action*" (RBCA), basada en las etapas de Modelo Conceptual Preliminar (MCP), Caracterización del Sitio, Modelo Conceptual del Sitio (MCS), hasta aquí sobre la base de la información generada para el estudio y el Análisis de Riesgos propiamente dicho. Como consecuencia se formulan las Acciones correctivas en función del Riesgo.

Como producto final, se propone el sistema considerado como más apto para la posible remediación de los acuíferos afectados y su diseño conceptual, sobre la crítica de los métodos probados disponibles, como base para su posterior implementación.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL AREA

El sector se halla situado en las proximidades del Paraje Las Horquetas, aledaño al Río Coyle o Coig y a su intersección con la Ruta Provincial N° 5. Fisiográficamente, se emplaza en el ámbito de la denominada Patagonia Extrandina Austral, contigua a la Patagonia Extrandina que se desarrolla desde la divisoria con el río Santa Cruz.

Se identifican dos grandes unidades geomórficas: las Planicies mesetiformes, planos suavemente ondulados a colinados con materiales aflorantes arenosos y arcillosos cubiertos por gravas, y Planicies fluvio-glaciales, planicies de cubierta gravosa disectadas por cauces cuyos valles forman una sub-unidad.

El área objeto está emplazada sobre una planicie con suave inclinación hacia el Este en dirección a Las Horquetas y hacia el Noroeste, donde se yuxtapone con la aluvial del río Coyle Brazo Sur.

Pertenece hidrográficamente a la cuenca del Río Coyle, de diseño mayormente dendrítico y conformada por dos subcuencas: la del Coyle propiamente dicho y la del Brazo Sur. Esta última (donde se halla la zona de interés) se origina en elevaciones precordilleranas del orden de los 700 a 900 m sobre el nivel del mar. Se trata de estribaciones de la Cordillera Chica y Meseta de Latorre recibiendo por margen izquierda el tributo de los arroyos Chorrillo Solitario, Chorrillo de los Vascos y Cañadón Corpie Aike y por margen derecha el del arroyo Chorrillo Magán.

Ambos cursos principales confluyen inmediatamente aguas debajo de Las Horquetas, cambiando a pocos kilómetros de rumbo desde Oeste-Este al francamente Noreste, para desembocar en el Océano Atlántico en Puerto Coig, luego de trascender el estuario homónimo. Totaliza la cuenca unos 14.600 km², con longitud del curso principal del orden de los 350 km.

No existe información sistemática acerca de los caudales erogados por el Río Coyle, salvo aforos practicados esporádicamente precisamente en Las Horquetas, que permiten estimar un módulo de 5 m³/seg, con extremos medidos de 3,35 m³/seg y 6,87 m³/seg.

El marco geológico está caracterizado por la omnipresencia de un tapiz gravoso, que en los niveles terrazados suprayace a delgadas capas de arenas y gravas. Desde los 7-10 m de profundidad se sucede una secuencia arcillosa de coloración verdosa, muy plástica, de espesor 28-30 m por sobre limos, limos arenosos y limos arcillosos con intercalaciones de arenas muy finas. En el ámbito de las planicies fluvio-glaciales y valles, bajo la cubierta areno-gravosa suele continuar una secuencia de materiales de mediana a relativamente alta permeabilidad cubriendo a los limos descriptos que parecen observar una continuidad al menos subregional.

Los suelos se corresponden con los dos paisajes dominantes, ambiente de mesetas y valle del Coyle. En el primero son *Aridisoles* del suborden *Argides* (*Haplargides borólicas*), pedregosos, normalmente bien drenados con erosión eólica moderada. Responden al perfil tipo A1, IIB2t, III Cca. El primer horizonte es el epipedon ochrico, oscuro y con materia orgánica. El IIB2t es argílico, bien estructurado y alcanza 0,20 m de espesor. En el valle del Coyle, son *Molisoles* del suborden *Xeroles* (*Argixerolles boralficos*) muy pedregosos, bien drenados con erosión hídrica moderada. Responden a dos texturas diferentes: el A1 de 20 cm de desarrollo es franco arcillo arenoso mientras que los horizontes IIB21t, IIB22t, IIB3 y IIC son netamente arcillosos. Hay presencia de grava fina en todo el perfil.

La vegetación predominante asociada es de festuca, neneo, mata negra y rama negra en las terrazas y de coirón con áreas de mata negra en los valles y sus pendientes.

El clima local es de tipo Templado frío (Semiárido-árido de meseta), con un módulo pluviométrico anual del orden de los 237 mm (Estación Servicio Meteorológico Nacional Río Gallegos, record 1931-1990). El pluviograma para las medias mensuales es polimodal, con una moda principal estival y una secundaria en el mes de Mayo. Las medias mensuales extremas para el período son de 33 mm (Enero) y 11 mm (Setiembre). La estación más lluviosa es el Verano con el 34% de la media anual y la menos húmeda la Primavera (19.8 %). Está caracterizado por una gran variabilidad temporal, condición propia de las regiones áridas.

La tasa de evapotranspiración potencial alcanza una media del orden de los 670 mm/año, resultando un déficit hídrico del orden de los 433 mm/año, acorde con las características de aridez reconocidas en la comarca.

La actividad socioeconómica en la comarca fue tradicionalmente la ganadería ovina, hoy retraída por problemas de mercado acaecidos desde la década de los años '70. En la actualidad se destaca la originada en la producción de petróleo y gas que no está manifestada por asentamientos permanentes. El sitio está atravesado por dos oleoductos paralelos que vinculan los yacimientos María Inés y Campo Boleadoras con Punta Loyola, ocurriendo el accidente precisamente en la trampa Scrapper localizada sobre el primer ducto.

La vía de comunicación principal es la Ruta Provincial N° 5 que vincula a la zona con la capital provincial y desde su intersección con la Ruta Provincial N° 11, con El Calafate. Existen accesos secundarios, muchos de ellos relacionados con la actividad petrolífera.

El Paraje Las Horquetas, a 2 km del sitio del derrame, es la única radicación en la zona, contando con una hostería, estación de venta de combustible, telefonía y servicio de comercio menor. Poblaciones rurales aledañas son los cascos de los establecimientos Las Horquetas y La Regalona.

3. MODELO CONCEPTUAL

La elaboración del modelo conceptual parte de la consideración de dos elementos básicos: el medio físico y la dinámica hidrológica más un tercer componente interfacial cual es la vegetación que paradójicamente, y pese a tratarse de un escenario pobre en cuanto a cobertura y diversidad, cumple un rol esencial.

El medio físico y conforme a lo descripto más arriba, aporta al modelo la característica fisiográfica dominante: los niveles terrazados o los planos aluviales tipificados por un relieve subhorizontal continente de bajos transitoriamente endorreicos, cañadones y cursos de agua en el último caso. La geología ofrece un medio permeable en los términos superficiales y otro entre acuitardo y acuícludo a profundidad, conformando un esquema típicamente anisotrópico con cierta homogeneidad regional. Tanto el material geológico superficial como los suelos soportados son permeables y buenos receptores/trasmisores del aporte vertical atmosférico (Figuras 3a y 3b).

La dinámica hidrológica ofrece un importante déficit hídrico (del orden de 430 mm/año) pero los aportes finisotoñales e invernales permanecen retenidos en superficie (hielo, nieve) y retornan rápidamente al ciclo en la época primaveral configurando una verdadera recarga diferida (Hernández et al, 2002), favorecida por la prevalencia de calmas, máximos de presión barométrica y de humedad relativa.

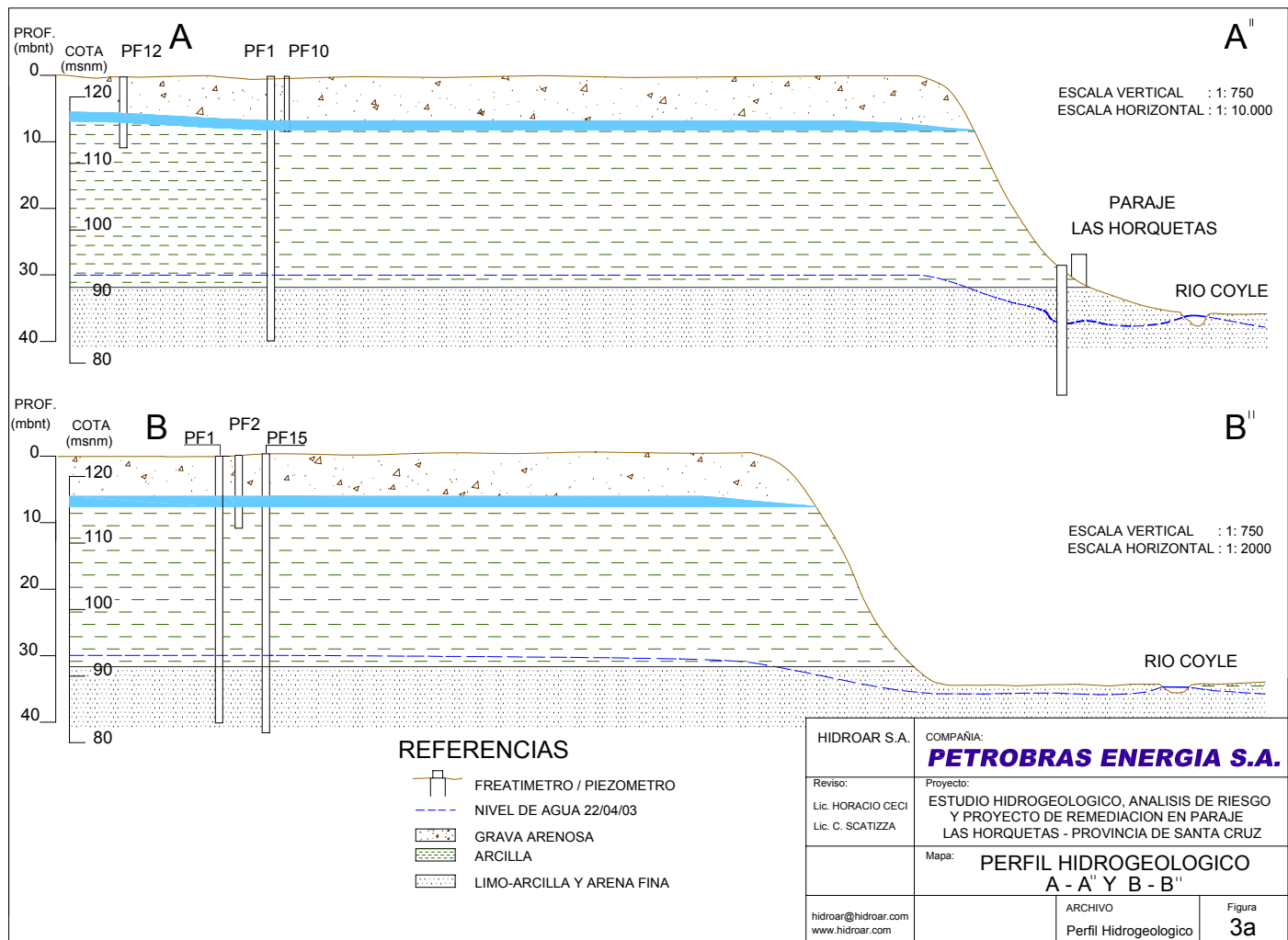
El tránsito del agua por la zona no saturada ocurre con cierta facilidad otorgada por la permeabilidad del medio en su expresión más somera. La anisotropía vertical ofrece una discontinuidad correspondiente a las arcillas verdes, que actúan como hidroapoyo de una primera manifestación acuífera.

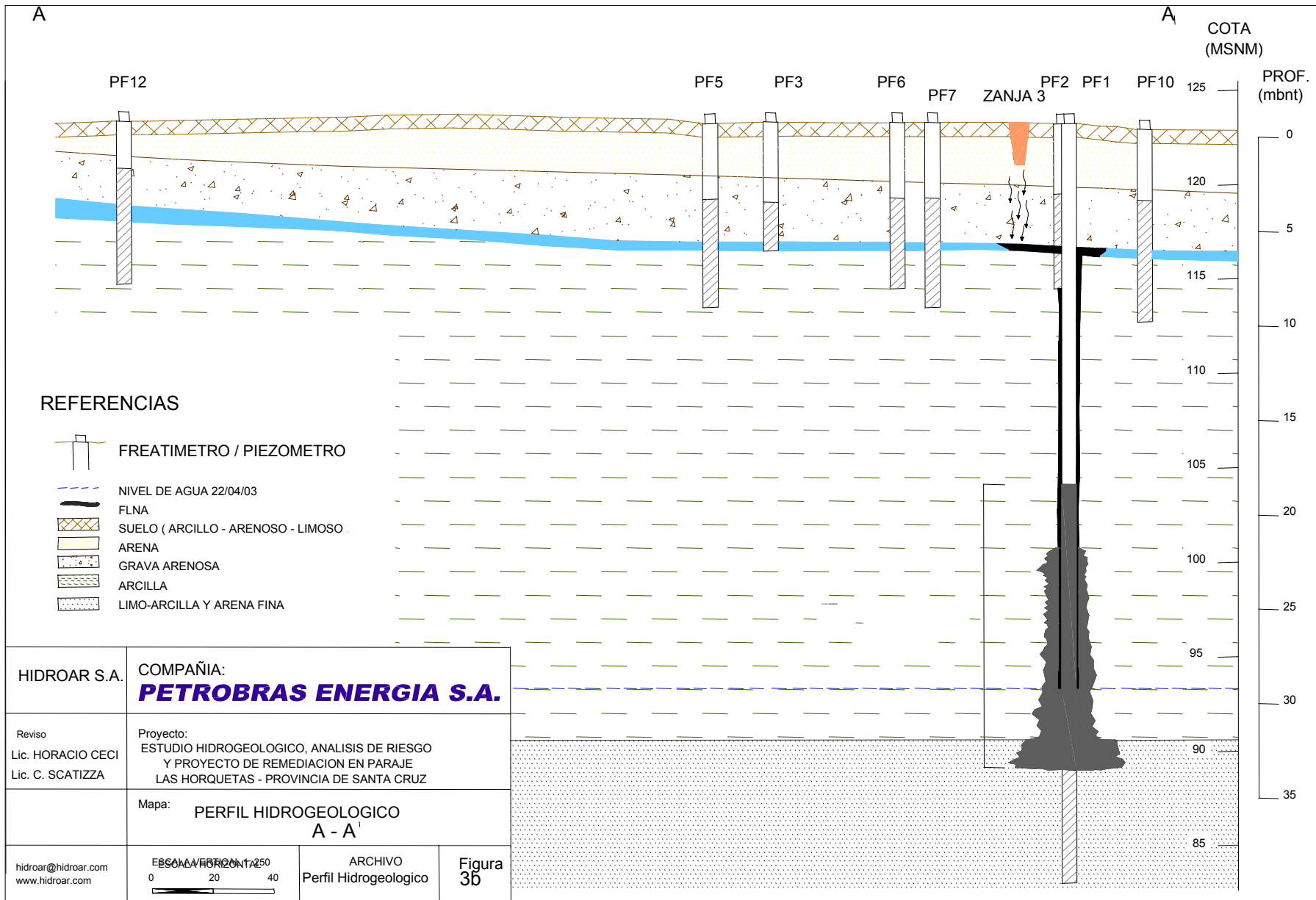
Esta unidad es de comportamiento freático, exhibiendo como rasgo principal su carácter temporario (corroborado por los antecedentes recogidos) ya que prácticamente se agota avanzada la estación estival. La descarga local se materializa en la planicie aluvial del río Coyle (Figuras 3a y 4) con un gradiente hidráulico de $9 \cdot 10^{-3}$ y velocidad efectiva del orden de $6.4 \cdot 10^{-2}$ m/día. Los valores parametrales (obtenidos de ensayos de adición de agua Gilg-Gavard) son: Coeficiente de Permeabilidad (K) = 0.5 m/d; Coeficiente de Trasmisividad (K) = $1 \text{ m}^2/\text{d}$ y de Almacenamiento (porosidad efectiva por ser acuífero libre) asignado por granometría de 0.07.

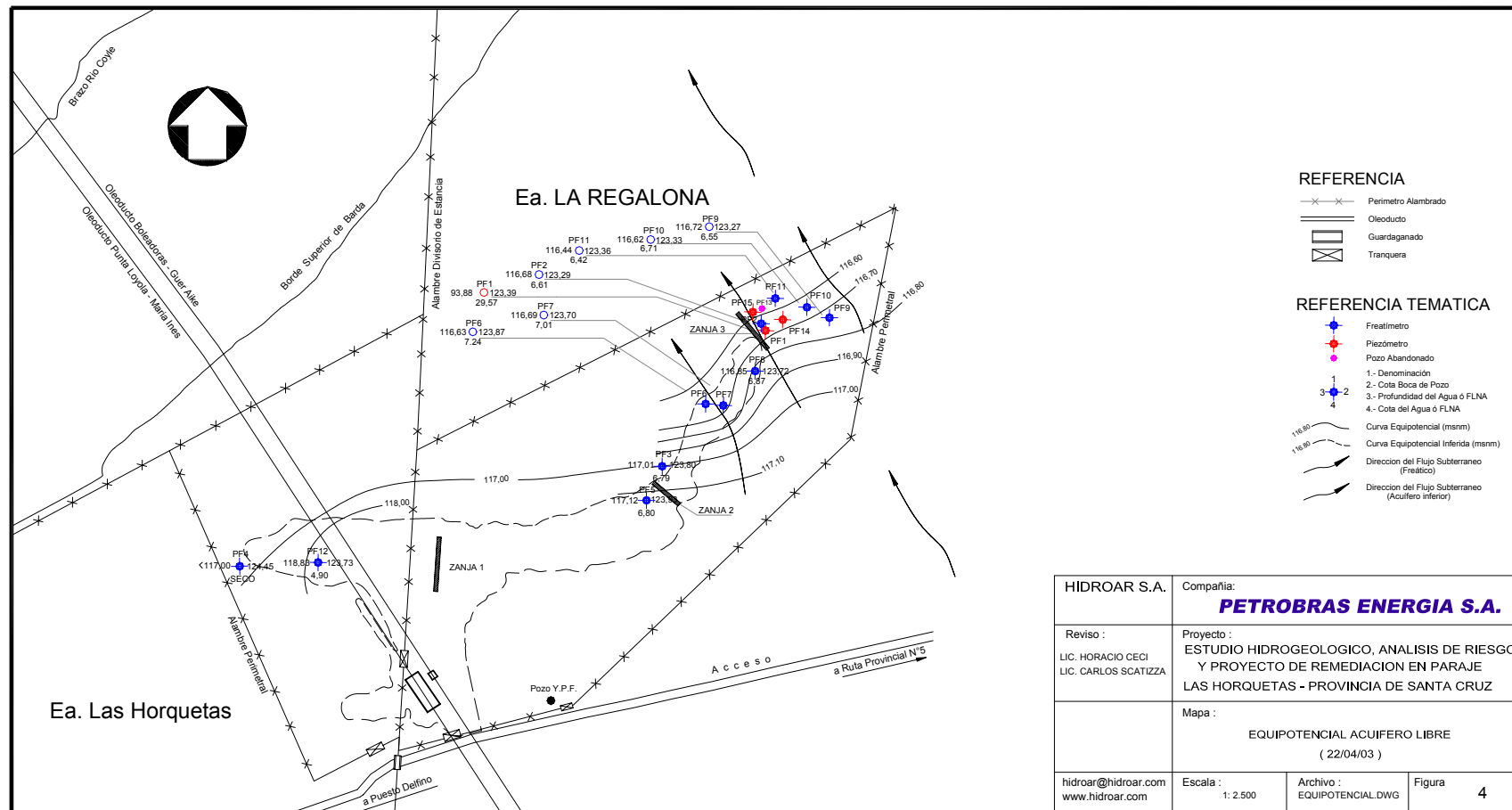
Si bien la planicie aluvial del Coyle es comprobadamente zona de descarga, el álveo del río es influente como pudo verificarse por los sondeos practicados “ad hoc” (Figura 3a).

El espesor arcilloso que subyace a esta unidad acuífera superior posee carácter acuitardo, con un Coeficiente de Trasmisividad vertical (T') de $4 \cdot 10^{-3} \text{ día}^{-1}$ obtenido del ensayo de bombeo practicado y resuelto por el método de Hantush.

El acuitardo se interpone entre la unidad acuífera superior descripta, de otra inferior de comportamiento semiconfinado (alumbrada por los sondeos PF 1, PF 14 y PF 15, Figura 2) cuya base no pudo ser alcanzada. Su recarga es subregionalmente producto de la filtración vertical desde la unidad superior y la descarga dirigida en el mismo sentido que ésta (hacia la planicie del Coyle).







HIDROAR S.A.	Compañía: PETROBRAS ENERGIA S.A.		
Reviso : LIC. HORACIO CECI LIC. CARLOS SCATIZZA	Proyecto : ESTUDIO HIDROGEOLOGICO, ANALISIS DE RIESGO Y PROYECTO DE REMEDIACION EN PARAJE LAS HORQUETAS - PROVINCIA DE SANTA CRUZ		
	Mapa : EQUIPOTENCIAL ACUÍFERO LIBRE (22/04/03)		
hidroar@hidroar.com www.hidroar.com	Escala : 1: 2.500	Archivo : EQUIPOTENCIAL.DWG	Figura 4

Pudieron reconocerse afloramientos por manantiales sobre el escalón de terraza adenaño a la planicie.

Los parámetros geohidrológicos calculados por ensayo de bombeo son: $K = < 2 \text{ m/d}$; $T = 16 \text{ m}^2/\text{d}$ y $S = 5.5 \cdot 10^{-4}$, este último característico de acuíferos semiconfinados al igual que el valor de T' del techo acuitardo.

El rol de la vegetación en este modelo está dado por su carácter xerófito, ya que las especies reconocidas como mata negra (*Chilliotrichum diffusum*), rama negra (*Junellia tridens*), coirón (*Poa linguaris*, *Stipa humulis*), festuca, mataguanaco (*Anarthrophyllum rigidum*), neneo, matamora (*Senecio filaginoides*) y otras, son especializadas a regímenes áridos y por tanto carentes de estomas (Hernandez et al, 2002). La oportunidad de pérdidas consuntivas es consecuentemente mínima y la recarga maximizada respecto de la ocurrencia de precipitaciones pluviales y congelamiento invernal de suelos.

En síntesis, el modelo reconoce una recarga local autóctona y directa a la unidad superior, favorecida por su carácter diferido en invierno, la reducción consuntiva de la vegetación, la geomorfología y la permeabilidad del medio. La circulación es de baja velocidad efectiva e incluye la filtración vertical descendente hacia la unidad inferior. Ambas unidades acuíferas descargan hacia el valle del Coyle, al cual concurre también el aporte influente del río.

El correlato hidroquímico está evidenciado por la presencia de aguas de baja salinidad ($< 500 \text{ ppm}$ de sales totales). Son bicarbonatadas calco-sódicas en el miembro superior, mientras que las del miembro inferior resultan cloruradas-bicarbonatadas sódicas. Es una evidencia por una parte, de la procedencia atmosférica de la recarga en el miembro superior por el predominio de los bicarbonatos y el calcio. Por otra, de la evolución según el flujo, en este caso por filtración vertical descendente hacia el miembro inferior.

El razonamiento hidroquímico, como se verá, es esencial al momento de explicar la migración de los hidrocarburos en el medio subterráneo.

4. CARACTERIZACION DE LA CONTAMINACIÓN

4.1 Suelos

El suelo fue el primer elemento afectado por el derrame y luego de las acciones iniciales de contención y restauración, se consiguió concretar una limpieza superficial bastante eficaz, proseguida por la labor encargada al INTA para la realización de trabajos de bioremediación y revegetación.

Desde la óptica de las aguas subterráneas y su interacción con el suelo, como elemento de transmisión de las sustancias contaminantes, se analiza el estado de presencia de gases de HC ocluidos en la trama clástica del suelo y de HC's en el material sólido.

Todas las muestras de gases ocluidos acusaron lógicamente presencia de los gases ambientales (Nitrógeno y dióxido de Carbono) y solamente en dos se detectó la presencia de alcanos: en la primera Hexano (0.30 ppm), Heptano (0.30 ppm) y Octano (0.70 ppm) y en la segunda, Heptano (7.00) y Octano (2.00). Estas manifestaciones son puntuales como se observa en la Figura 2, sin mayor valor diagnóstico que la existencia de gases residuales luego de un evento de derrame superficial.

Los lugares donde se extrajeron muestras de suelos para análisis químicos (Figura 2) fueron seleccionados en función de las evidencias superficiales y proximidad a los freáticos en los cuales se detectó la presencia de FLNA. El muestreo se realizó a 0.30 m y 0.40 m de profundidad.

No se detectó presencia de hidrocarburos aromáticos. Se revelaron en cambio concentraciones de hidrocarburos totales (HTP) entre 55.5 mg/kg (LH2) y 1590 mg/kg (LH1), evidenciando el sitio donde puntualmente podría existir una fase residual como testimonio del acceso del producto derramado al subsuelo.

4.2 Aguas subterráneas

Fase libre.

Inicialmente se constató la presencia de FLNA con un espesor de 0.30 m en el freático PF 2 (miembro acuífero superior) y de 6.40 m en el PF1 (miembro acuífero inferior). Al momento del reconocimiento la potencia de la FLNA fue de 0.36 m y 14.70 m respectivamente. En lo que respecta al miembro acuífero superior, es evidente que fue el receptor original del acceso accidental de hidrocarburos al subsuelo a partir de una localización puntual próxima.

Con la ejecución de las ocho (8) perforaciones de exploración y freáticas, ninguna de ellas con presencia de FLNA, se pudo comprobar la puntualidad de ocurrencia del sobrenadante en el acuífero temporal. Acuden a este juicio de valor las siguientes evidencias:

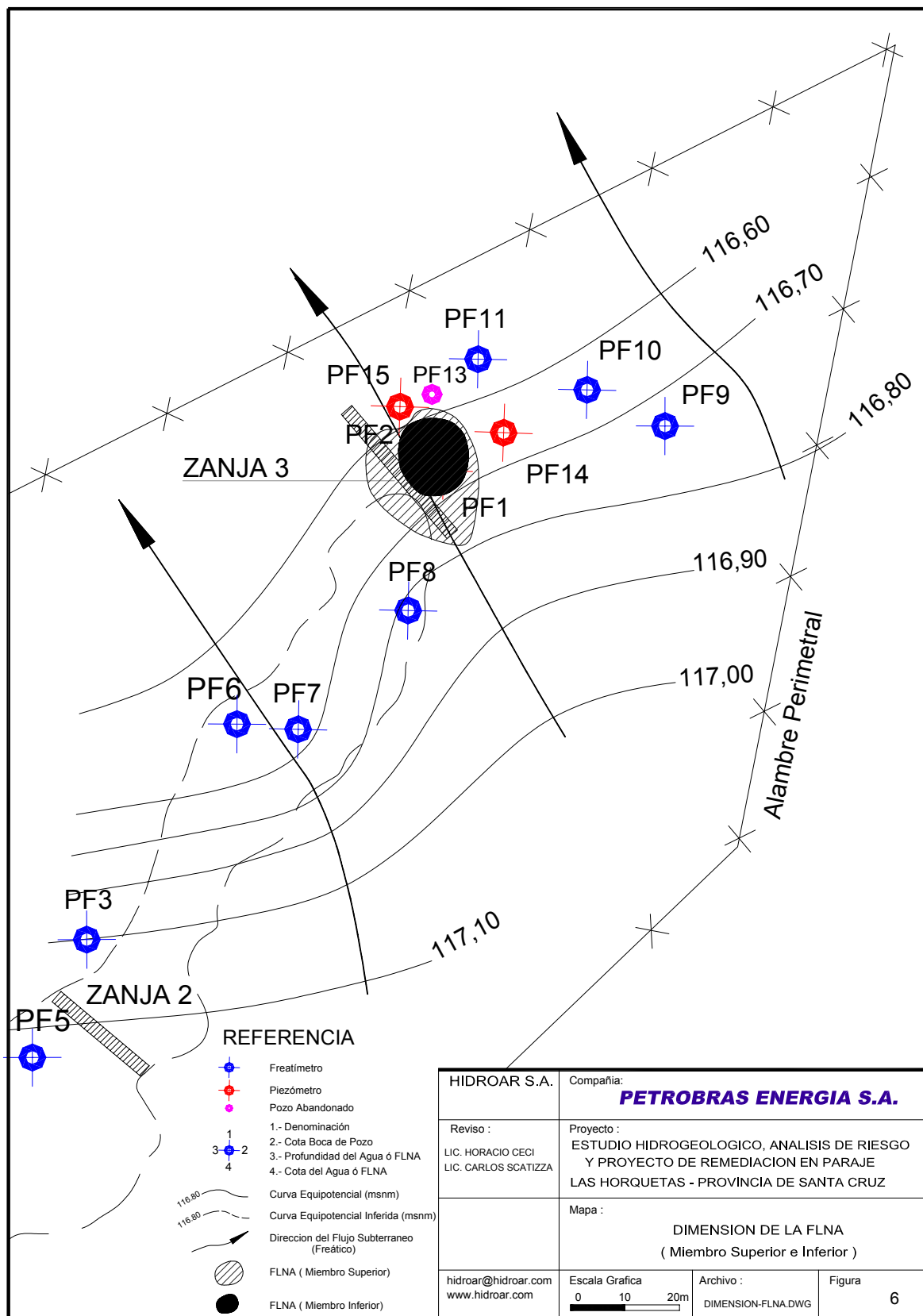
- El espesor de la FLNA debería haber disminuido entre la medición original y la realizada durante el reconocimiento realizado por Hidroar SA, simplemente por el aplanamiento del sobrenadante a consecuencia migración, al haberse suprimido la fuente. En cambio se pasó de 0.30 m a 0.36 m en el ínterin.
- Durante el ensayo de recuperación de fluidos en el PF 1, el espesor de la FLNA en el pozo PF 2 se redujo en solo un centímetro, contra los 9.28 m en el PF 1.
- Cuando se perforaron los pozos someros PF 8, PF 9, PF 10, y PF 11 por el sistema sin inyección de agua (air lift o mecha helicoidal), se constató un efecto pistón en el miembro acuífero, manifestado por la fluctuación inmediata del nivel de los fluidos en el PF 2, ratificando la conexión hidráulica entre los diferentes pozos al mismo miembro acuífero. Lo mismo ocurrió cuando se alumbró este miembro en los sondeos PF 14 y PF 15.
- Los valores de velocidad efectiva del flujo subterráneo para este miembro se compadecen con el razonamiento.

Es claro que el hidrocarburo no ha migrado mayormente, en razón de la baja energía del acuífero temporal, y se mantiene a modo de “lentejón” en las inmediaciones del PF2, favorecido por la conexión con el nivel inferior.

Para el cómputo del volumen de HC alojado, se recurrió a la elaboración de un mapa isopáquico, producto de la interpolación entre el espesor corregido de FLNA y los puntos valor cero más próximos, con el procesador Winsurfer 32 en la modalidad krigging (Figura 6). Con el volumen involucrado calculado por el propio programa y el valor de porosidad efectiva de 0.07, se ha estimado un volumen remanente de 1.9 m³.

Más dificultosa resulta la comprensión del mecanismo de acceso y permanencia de la FLNA en el miembro acuífero inferior. La presunción original fue de un ingreso puntual a través del sondeo PF1 y los estudios desarrollados corroboraron plenamente este hecho, en especial según las siguientes evidencias:

- No se constató la existencia de FLNA en los sondeos PF 14 y PF 15, suficientemente próximos.
- Durante la ejecución de estas perforaciones, se observaron fluctuaciones en el nivel de la interfase en el PF 1, de manera análoga a lo que ocurría en el miembro superior pero de manera diferida, sugiriendo la existencia de una fuente activa.



- La respuesta del espesor del sobrenadante y de la profundidad de la interfase durante los ensayos de recuperación.
- La evolución de la relación HC's/agua.
- La interpretación de los diagramas hidroquímicos elaborados (Piper, Schoeller-Berkaloff) que muestran claramente la mezcla de aguas de ambos miembros en el sondeo PF 1.

De esta manera, la hipótesis sostenible avalada por múltiples evidencias es la de una comunicación del producto originalmente radicado en el miembro superior a través del sondeo PF 1, por problemas en la cementación que debería aislar a ambas unidades.

Durante el descenso del hidrocarburo, se produce una impregnación de las arcillas verdes interpuestas, que origina el retardo en la afluencia hacia el miembro inferior. Esto explica la permanencia de la fuente sin afectación instantánea al espesor de FLNA del miembro superior. Aún cuando pudiese desalojarse la FLNA en ambos acuíferos, perduraría la lenta liberación del HC retenido en las arcillas.

El defecto en la cementación del PF 1 puede explicarse por el hecho de que al momento de su perforación, el nivel piezométrico habría ascendido hasta una profundidad de 2.45 m bbdp, haciendo presumir que no era necesaria una cementación más completa que la realizada. Al tomar la superficie piezométrica su posición de equilibrio, producida la liberación inicial de presión, el tapón de cemento construido no resultó suficiente y originó el acceso. Queda clara la necesidad original de haber decidido la construcción del PF 1 ante la carencia de información geológica de subsuelo.

La construcción de las perforaciones PF 14 y PF 15 produjeron en cambio una aislación efectiva, concretada por cementación con circulación inversa y espesor efectivo de 10 m, verificada mediante prueba de estanqueidad.

El cómputo del volumen de HC alojado se condujo igual que en el caso del miembro acuífero superior, mediante un mapa isopáquico del espesor corregido de FLNA (Figura 6). Con el volumen involucrado calculado por el propio programa y el valor de porosidad efectiva de 0.05 (ítem 6.3), se ha estimado un volumen remanente de 0.80 m³.

Resulta necesario aclarar que esta estimación conlleva un grado importante de incertidumbre, ante la imposibilidad de cuantificar la cantidad de HC atrapado en las arcillas y en lenta migración vertical por goteo, lo cual da lugar a una manera peculiar de remediación más adelante explicitada.

Fase soluble.

En el miembro acuífero superior, la presencia de metales se da en los freáticos PF 10 y PF 12 con tenores de 0.084 y 0.016 mg/l en Pb. El Zn está presente en todas las muestras entre 0.09 y 0.18 mg/l. Se trata como se nota, de contenidos muy bajos. No se detectaron Cd, Ni ni Hg.

El freático PF 2 lógicamente registra la mayor presencia de hidrocarburos, tanto BETX como HC's volátiles, debido a la presencia del producto sobrenadante. Los restantes fundamentalmente carecen de Benceno y solamente el PF 5 acusa ligera manifestación de Etilbenceno, Xilenos y VOC's y los PF 10 y PF 12 Tolueno < 0.015 mg/l.

En el miembro acuífero inferior aparecen entre los metales únicamente Cinc en el PF 1 (1.36 mg/l) y Plomo (0.013 mg/l) en el PF 14. No existe Benceno en sus aguas, solamente se detectó Tolueno en el PF 14 (0.015 mg/l) y Xilenos en el PF 15 (< 0.05 mg/l).

No puede reconocerse vinculación de la ocurrencia de los metales e hidrocarburos provenientes del derrame, con las características del medio físico ni de los procesos geohidrológicos. Las concentraciones están vinculadas fundamentalmente con la afectación puntual en las localizaciones correspondientes a los pozos PF 1 y PF 2.

5. BALANCE DE MASAS

Un elemento de juicio manejado inicialmente por Petrobras Energía fue la resolución de un balance masas del producto derramado a fin de poder discretizar, a partir de la cantidad efectivamente derramada, cual fue la correspondiente a la recuperación inicial, cual la pérdida hacia la atmósfera y el remanente asignable al destino subterráneo.

Es admisible una diferencia que correspondería al hidrocarburo retenido en la superficie inmediata del suelo y superficie vegetal y al propio y razonable error en la cuantificación. Sobre un total de petróleo derramado desde el oleoducto de 927 m³, se recuperaron físicamente 530 m³. Restarían entonces 397 m³ para poder equilibrar un balance másico.

El Laboratorio de Petrobras Energía realizó el análisis cromatográfico (Cromatografía gaseosa con detector de Ionización de Flama) sobre muestras provenientes del crudo transportado por el oleoducto María Inés- Punta Loyola en la trampa scrapper y de la Fase libre muestreada en los freáticos PF 2 y PF1. Puede notarse en el Cuadro 1 la similitud entre ambos cromatogramas desde el Pentano-Hexano en número creciente de Carbono, lo cual está indicando la pérdida por evaporación de los componentes más livianos, cuyo residuo volumétrico corresponde al producto yacente a modo de Fase libre en el medio subterráneo.

	Oleoducto	FLNA PF 1	FLNA PF 2
Fecha análisis	01/03/03	01/03/03	01/03/03
Componentes	% masa	% masa	%masa
Metano	0,00	0,00	0,00
Etano	0,03	0,00	0,00
Propano	0,81	0,00	0,00
i-Butano	1,39	0,00	0,00
Butano	2,87	0,01	0,01
i-Pentano	2,97	0,02	0,02
Pentanos	3,32	0,04	0,01
Hexanos	6,68	0,61	0,66
Heptanos	10,92	4,13	4,43
Octanos	13,53	10,99	11,60
Nonanos	9,10	11,46	11,51
Decanos	7,44	10,91	11,37
C-11	5,77	8,89	9,51
C-12	4,73	7,86	8,14
C-13	3,85	7,05	6,85
C-14	3,15	5,43	5,35
C-15	2,70	4,76	4,33
C-16	3,07	3,99	3,81
C-17	4,00	4,39	3,89
C-18	1,92	3,85	3,21
C-19	1,90	3,57	2,40
C-20	1,50	2,77	1,93
C-21+ 22+24+24	8,34	9,27	10,97
Densid. (Calc.)	0,74	0,77	0,77
Densid. (Med.)	0,777	0,803	0,802

Cuadro 1: Análisis cromatográfico

Estas determinaciones se ampliaron hasta C-36 en un laboratorio particular.

Se observa que los componentes livianos (C-1 a C-5) han experimentado una volatilización que explica su ausencia en la FLNA, marcando que parte del volumen total ha tenido un destino atmosférico.

Se realizaron en laboratorio dos experiencias tendientes a obtener las pérdidas por volatilización, a partir de la permanencia en superficie del hidrocarburo, utilizando petróleo María Inés tomado en la trampa scrapper. En primer lugar se corrió un ensayo de incremento de densidad por evaporación de crudo, utilizando balanza y picnómetro para registrar las variaciones de densidad del producto debido a las pérdidas por evaporación. El ensayo se llevó a cabo en heladera a 4°C para simular las condiciones ambientales en el momento del derrame.

La otra prueba fue de evaporación de crudo, registrando en balanza de precisión las pérdidas por evaporación de una cantidad inicial sobre una cápsula de Petri $\varnothing$ 60 mm, en heladera a temperatura constante 4°C durante cinco días. Se reproducen seguidamente la tabla de resultados y gráfica correspondiente al ensayo conducido por el Laboratorio de Petrobras Energía.

Día de Ensayo	Peso de Crudo g	Perdida acumulada %	Perdidas Parciales %
1	7,6601		
2	5,629	26,5	26,5
3	4,9887	34,9	8,4
4	4,684	38,9	4,0
5	4,4626	41,7	2,9

Cuadro 2: Ensayo de pérdidas por evaporación

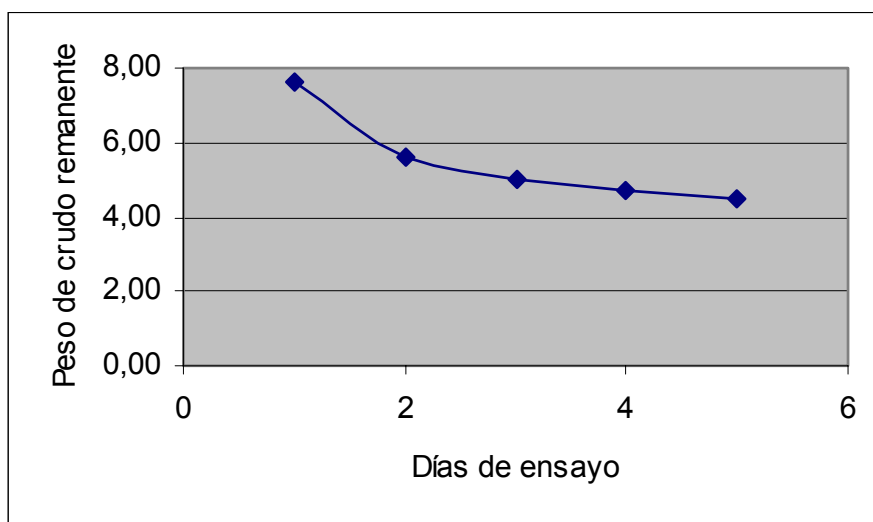


Figura 5

Retomando las cifras iniciales del petróleo extruído, la cuantía de su recuperación mecánica y el volumen vaporizado desde superficie atendiendo a las experiencias de laboratorio, el balance de masas quedaría expresado de la siguiente manera:

$$VTD - (V_{rp} + V_{vp} + V_i) = 0 , \quad \text{donde:}$$

VTD : Volumen total vertido

V_{rp} : Volumen recuperado

V_{vp} : Volumen vaporizado

V_i : Volumen infiltrado + otros

El término V_{vp} obtenido de las experiencias de laboratorio, no tiene lógicamente en cuenta el efecto del viento en cuanto a la renovación de las masas de aire no saturado y por lo tanto, en capacidad de absorción de vapor dentro de los valores de tensión normales para la masa de reemplazo advectivo. Se optó por adjudicar, en función de los vientos dominantes en el mes de ocurrencia del derrame, un coeficiente conservador de ajuste de 1.015. Otorgando los valores determinados precedentemente y despejando la incógnita, cual es el Volumen infiltrado, quedaría:

$$V_i = 927 \text{ m}^3 - 530 \text{ m}^3 - 392.3 \text{ m}^3 = 4.7 \text{ m}^3$$

Si se tiene en cuenta que durante el ensayo de recuperación de fluidos desde el miembro acuífero inferior se restaron 0.9 m³ de HC's, quedarían en el subsuelo 3.8 m³ independientemente de las cifras menores de su permanencia como impregnación superficial remanente y en plantas.

Este último valor se compadece con el cálculo de volumen almacenado en la FLNA en ambos miembros acuíferos (2.7 m³). La pequeña diferencia entre ambas cifras (1.1 m³) está dada por la circunstancia aludida en el fin del párrafo anterior y por la existencia de HC's en tránsito por el pozo PF 1 e impregnación en las arcillas, además del lógico error de cálculo que podría existir.

6. ANÁLISIS DE RIESGO

Fue conducido según la normativa ASTM 1739/95 ("Risk-Based Corrective Action") conocida como RBCA. Los resultados sintéticamente expresados son:

El Análisis de Riesgo ha sido realizado tomando los valores más conservadores que establece la normativa aplicada. La clasificación del lugar en función del Riesgo manifiesta un **Rango 2** (Amenaza cercana significativa del término 0 a 1 año para la salud humana, la seguridad y los receptores ambientales sensibles), orden que se justifica por la afectación de un acuífero apto para la ingesta humana.

Los objetivos de limpieza han sido calculados teniendo en cuenta la presencia de una fase libre no acuosa y por tanto, presencia del material sólido saturado con Hidrocarburos con emisión de vapores orgánicos. Para la fase disuelta en agua subterránea se han tomado los máximos de Benceno (0.058 ppm) y Plomo (0.084 ppm) hallados en este medio.

Los resultados obtenidos muestran que la vía de exposición de mayor riesgo es la inhalación de volátiles. Para esta vía de exposición, las concentraciones del Benceno presentes en suelos saturados, exceden los valores hallados para las condiciones de exposición establecidas.

El Riesgo establecido a partir de las dosis a que los trabajadores del lugar, abocados a tareas de excavación, pueden estar expuestos es, para los compuestos no cancerígenos, inferior a la unidad y por tanto no implica riesgo alguno. Para el caso del Benceno, el riesgo calculado supera el índice de 10⁻⁵ establecido para los compuestos cancerígenos.

Referente al riesgo de migración de los contaminantes en agua subterránea, los valores hallados en relación al volumen contaminado, a la permeabilidad y gradiente hidráulico específico y al factor de retardación para los compuestos investigados, indican una movilidad muy reducida.

7. PROPUESTA DE REMEDIACION

Sobre la base de la necesaria remediación del lugar, emergente del precedente Análisis de Riesgo, los determinantes de la operación que se efectúe son:

Presencia de Fase Líquida No Acuosa en ambos miembros acuíferos

Presencia de volátiles (Benceno) en la Zona No Saturada

Presencia de Benceno y Plomo en Fase soluble en ambos miembros acuíferos

Diferente dinámica en ambas unidades

Existencia de una comunicación vertical de la FLNA entre ambas unidades, focalizada en el sondeo PF 1

Existencia de impregnación con hidrocarburos en las arcillas interpuestas

Escaso volumen de la afectación

Es evidente que deberá operarse un sistema de remediación selectivo, ya que se trata de dos objetivos particulares: la FLNA del miembro superior y Zona No Saturada por una parte y la FLNA y Fase soluble del miembro inferior por otra.

7.1 Remediación en el miembro superior y Zona No Saturada

La necesidad de eliminar la FLNA y los vapores orgánicos contenidos en la ZNS, dirige la propuesta concretamente a un sistema de extracción por vacío (doble fase), el único que por sus características puede atacar simultáneamente ambas componentes. La propuesta parte de la construcción de un sondeo específicamente diseñado, de profundidad aproximada 8 m, entubado en 4 " y longitud de filtros ranura continua de 3 a 4 m, con su correspondiente prefiltro de grava. Para lograr que este último cuente con un espesor eficaz, el diámetro de la perforación debería ser de 8". Este sondeo será acompañado de un mínimo de otros cuatro para completar la batería de vacío. La correcta operación del sistema, que requiere un equipo de reducidas dimensiones, permitirá además del desalojo de la FLNA, la recuperación de la fase gas contenida en la ZNS y una buena parte de la fase soluble.

7.2 Remediación en el miembro inferior

La técnica seleccionada para este caso tiene en cuenta la existencia de migración activa e impregnación del término arcilloso. Por lo tanto se requiere la correcta aislación del miembro inferior y confinamiento del HC's retenido en las arcillas, para luego proceder al desalojo neumático de la FLNA.

Será necesaria la intervención del actual PF1, reperforando en Ø 16 " hasta los 12 m. Luego de cementar desde el fondo de pozo hacia superficie, se reperforará en Ø 9 " hasta una profundidad de 38 m. El tramo filtrante (ranura continua, Ø 4 ") estará desde los 20 m hasta los 38 m. Se propone la instalación de un prefiltro de grava diámetro 2.4 a 4.2 mm, para favorecer que parte de la impregnación de la arcilla pueda migrar verticalmente hasta el sobrenadante.

El énfasis puesto en el tema de la cementación en el término inicial del pozo, tiene su fundamento en que se pretende, además de la correcta aislación del miembro superior, retención de parte del

fluido que impregna al paquete arcilloso, para su confinamiento por encima de los 12 m de profundidad.

Para la extracción de la FLNA y parte de la fase soluble (hasta los límites aceptados) se recurrirá a una bomba neumática, que garantice un bajo régimen de bombeo (estimado en 200 l/hora) y especialmente, su continuidad. Previamente a la operación de remediación en sí e inclusive a la intervención del pozo PF 1, deberá procederse a un bombeo similar al que se practicó a modo de ensayo durante 2-3 días para evitar que durante la perforación de intervención, exista un desplazamiento descendente tipo pistón de HC's contenidos.

7.3 Manejo de los fluidos

Como resultará necesario movilizar un volumen apreciable de agua a fin de sanear la fase soluble hasta los límites admitidos, se prevé la posibilidad de su aplicación local para riego por aspersión del sector, previa consulta y diagramación operativa con INTA, para evitar un transporte ocioso y favorecer la mejor revegetación en el área.

La separación de los HC's del agua en ambos miembros debería hacerse en el lugar, ya que se trata de volúmenes reducidos, permitiendo la aplicación de la fase agua previamente filtrada a la finalidad precedentemente descripta.

7.4 Monitoreo

Antes, durante y a posteriori de las operaciones de remediación deberá conducirse un monitoreo frecuente, con toma de muestras y análisis químicos específicos, pudiendo utilizarse una red basada en los freátímetros construidos y los propios sondeos utilizados para la remediación.

8. CONCLUSIONES

Una parte de los HC's derramados como consecuencia de un incidente ocurrido en el oleoducto María Inés-Punta Loyola (Paraje Las Horquetas) tuvieron como destino el medio subterráneo, localizándose en dos miembros acuíferos reconocidos en el área: uno de carácter freático de ocurrencia temporaria y otro semiconfinado.

El acceso original se produjo hacia el miembro superior, con posterior migración al inferior a través del sondeo exploratorio a causa de una operación de cementación basada en la carga hidráulica inicial del primero, luego restituida a su equilibrio natural.

Según el balance de masas, de los 927 m³ de hidrocarburo liviano derramados en el incidente, 530 m³ fueron recuperados en superficie, 392.3 m³ volatilizados, 0.9 m³ recuperados desde el subsuelo permaneciendo en el sistema acuífero un volumen remanente de 3.8 m³.

El desarrollo de un exhaustivo estudio geohidrológico, pudieron reconocerse las propiedades hidrofísicas y la dinámica del flujo en ambos miembros, las características hidroquímicas y la ocurrencia de la contaminación.

En el miembro superior estarían radicados 1.9 m³ y 0.8 m³ en el inferior, estando los 1.1 m³ de diferencia entre este cómputo y el emergente del balance de masas explicados por la existencia de una fase residual en el acuitardo interpuesto, en ocurrencia superficial dispersa y como parte del error de cálculo.

El Análisis de Riesgo realizado en posesión de una información de sumo detalle, permite calificarlo como de Clase 2 de acuerdo a la metodología RBCA nivel Tier 2 (*ASTM E-1739/95*) que implica una intervención remediatoria antes de un año.

Consecuentemente, se plantea una operación selectiva en ambos miembros: en el superior mediante sustracción del contaminante por el sistema de vacío doble fase (involucra fases gas, libre, soluble y residual) y en el inferior por desalojo neumático de la FLNA - fase soluble y confinamiento de la impregnación en el acuitardo a través de una cementación especialmente diseñada.

El manejo de fluidos se realizará por fuera del área perimetrada, con separación “in situ”, transporte de los HC's bajo seguridad a la Planta María Inés y aplicación de la fase agua al riego en el procedimiento de revegetación natural conducido con la cooperación de INTA Río Gallegos.

Como complemento necesario, se propone un seguimiento de la Atenuación Natural residual según la norma ASTM E 1943-98 “*Standard Guide for Remediation of Ground Water by Natural Attenuation at Petroleum release Sites*”, a fin de corroborar la acción de los factores naturales analizados en los procesos de atenuación.

Figura 1

ASTM “Standard Guide for Sampling Groundwater Monitoring Well”. *ASTM D4448-85a*. 1985.

ASTM “Risk-Based Corrective Action”. *ASTM 1739/95*. 1995

Hernández, M.A. y N. González “Implicancias ambientales de la actividad petrolífera en sistemas acuíferos. Normas protectivas y casos ejemplo de Argentina”. *Memorias del 3er. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, 1:13-20. San Luis Potosí (México). 1996.

Hernández, M. A. “Estudio hidrológico en la región de Cerro Rubio - Cerro Vanguardia. Provincia de Santa Cruz”. Tesis Doctoral MLP. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de LA Plata, 2000 (inédito).

Hernández, M.A. , N. González y R. A. Sánchez. “Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas. Cuenca del Río Seco, Provincia de Santa Cruz. Argentina”. *XXXII IAH Congress - VI Congreso ALHSUD*. Mar del Plata, 21/25 de octubre de 2002. Ed. CD Rom.

Hidroar SA “Caracterización hidrogeológica, análisis de riesgos y Proyecto de remediación de aguas subterráneas. Sector Trampa Scrapper. Oleducto Maria Inés-Punta Loyola.”. Petrobras Energía. La Plata, 2003 (inédito).