



GPR 3D e Tomografia Elétrica como ferramentas do Diagnóstico Geo-Ambiental Integrado – Estudo de Caso

Celso Magalhães, Elaine C. Castro, Marco A. Cantisano, Brain Tecnologia, Ltda.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

O presente trabalho traz um exemplo de diagnóstico geo-ambiental executado em área impactada por vazamento de hidrocarbonetos. Foram aplicadas para este diagnóstico as técnicas GPR (Ground Penetrating Radar) 2D e 3D e Tomografia Elétrica, além de Sondagens e Análises Geoquímicas, tanto para solo quanto para água. Tal estudo teve por objetivos qualificar e quantificar o impacto causado por vazamento identificado pela surgência de óleo em um lago próximo à uma unidade de refino, na zona de descarga do aquífero subterrâneo. As técnicas geofísicas de imageamento subterrâneo (GPR e Tomografia Elétrica), associadas ao controle geológico por sondagens, foram fundamentais tanto na determinação das barreiras naturais existentes em subsuperfície, quanto no papel desempenhado pela presença de superfícies de fraturamento/falhas onde se deu a migração de fluidos. Tal caracterização permitiu retratar o meio físico, nos seus aspectos geológicos, hidrogeológicos e geoquímicos, proporcionando uma análise integrada da área em questão. A partir de tal análise, foi possível identificar, além das zonas mais contaminadas, ligadas à migração por falhas e fraturas, a área fonte para o vazamento e, sobretudo, os teores da contaminação, fornecendo base objetiva para uma avaliação de risco ambiental e para a definição de um projeto de remediação adequado.

Introdução

Os métodos GPR 2D, 3D e Tomografia Elétrica (Eletrorresistividade), integrados aos resultados geológicos de sondagens e à avaliação geoquímica, têm se mostrado eficientes, rápidos e seguros na avaliação de áreas impactadas por vazamentos de hidrocarbonetos e/ou produtos químicos, com economia de tempo e ampliação da base de dados geológicos e ambientais através de imagens georeferenciadas, além de permitirem uma racionalização dos trabalhos de sondagem e das análises geoquímicas, incorporando um número de interpretações iterativas e recursivas que aumentam a precisão da localização das zonas afetadas. Desta forma, essa metodologia tem fornecido subsídios para os cálculos e as estimativas objetivas das áreas, espessuras e volumes de material contaminado, assim como definir, com precisão, os modelos geológicos e hidrogeológicos, capazes de retratar o meio físico e a

distribuição espacial das plumas de contaminantes neles contidas.

Os levantamentos de dados GPR 2D e Tomografia Elétrica foram aplicados com vistas à avaliação do arcabouço bidimensional da área para o mapeamento de feições gerais, já o levantamento de dados GPR 3D teve como objetivo o detalhamento de feições observadas no mapeamento bidimensional, além da análise de amplitude do sinal GPR 3D para verificação de anomalia de amplitude ligada à presença de hidrocarbonetos. Todos os dados foram amarrados às informações das sondagens, que envolveram tanto a gênese do material quanto os teores dos contaminantes presentes, em pontos selecionados pela interpretação dos dados geofísicos. A integração de todos os dados permitiu a elaboração de mapas de teores de hidrocarbonetos detalhados para solo e água. Os resultados da interpretação radar-estratigráfica mostraram consistência horizontal e vertical, assim como coerência com os dados levantados pelas seções de Tomografia Elétrica e pelas sondagens. Nesse trabalho, foi implantado um sistema de banco de dados totalmente automatizado para controle ambiental do sítio, possibilitando acesso imediato à visualização da imagem subterrânea e aos resultados das análises químicas da área em questão.

Metodologia

Com a finalidade de se definir os parâmetros de aquisição para o GPR foram realizados testes experimentais com diferentes antenas (50, 200 e 250 MHz) e diversos intervalos de traços, intervalos de tempo de gravação (comprimento do registro) e número de empilhamentos por traço. Seis testes CMP (Common Mid Point) foram realizados, com o objetivo de se definir as funções velocidades para o processamento, ajustes hiperbólicos foram utilizados para definir os painéis de velocidades, com campos de velocidade variáveis (lateral e vertical). Esses testes orientaram a escolha dos parâmetros, tanto para o levantamento 2D quanto para o levantamento 3D, para os quais foi escolhida a antena de 50MHz no levantamento 2D e a antena de 100MHz no levantamento 3D. O Processamento 2D contou com as seguintes etapas: conversão de formato, geometria, ajuste para o tempo zero, filtragens de frequências (dewow), "declip", atenuação de ruído de fundo (background), filtro de frequências (passa banda), migração f-k, "mix" de três traços, filtro de frequências (passa banda), correções topográficas, conversão tempo-profundidade e saída em formato seg-y. Além dessas etapas, foram aplicadas as rotinas de definição da velocidade de migração aos dados oriundos com base nos CMP realizados e nos painéis de velocidade. Os trabalhos de aquisição 3D contaram com a realização de um levantamento, com 208 seções inline equiespaçadas a cada metro e intervalo de traços a cada 0,40m. A

geometria de aquisição adotada no campo permitiu a constituição de uma célula retangular de dimensões 0,40 m x 1,0 m (inline x crossline) para este bloco de dados. O processamento 3D contou com as seguintes etapas: conversão de formato, geometria, ajuste para o tempo zero, correções estáticas, filtragens de frequências (dewow), atenuação de ruído de fundo (background), ganho variável com tempo (espalhamento geométrico), equalização de amplitudes (rms), edição automática de amplitudes anômalas, filtro de frequências (passa banda), migração kirchhoff na direção inline, "sort" para a direção crossline, interpolação na direção crossline, migração kirchhoff na direção crossline, "sort" na direção inline, "mix" de três traços, filtro de frequências (passa banda), conversão tempo-profundidade e saída em formato seg-y. Após a interpolação de 1 traço no sentido crossline, a geometria do 3D passou a constituir células de dimensões 0,40 m x 0,50 m (inline x crossline). Foram também perfuradas sondagens a trado e rotativas, as quais tiveram como finalidades a definição do arcabouço estratigráfico e a coleta de amostras de solo e água subterrânea para análise geoquímica de compostos orgânicos e inorgânicos. Tais poços foram distribuídos pelo sítio em estudo, acompanhando as anomalias detectadas tanto nas seções de GPR 2D e 3D, quanto nas seções de Tomografia Elétrica. As seções de Tomografia Elétrica são mais comumente conhecidas como pseudo-seções de eletroresistividade, e tratam-se de uma moderna versão do método elétrico, que realiza automaticamente milhares de medições de decaimento do potencial elétrico induzido ao longo de uma seção de eletrodos dispostos no terreno, o que permite a construção de uma imagem elétrica contínua do subsolo. Com base nas medidas de resistividade elétrica foram gerados mapas de anomalia elétrica para intervalos de profundidades, os quais orientaram o direcionamento das sondagens para coleta de amostras de solo e água, com vistas à análise geoquímica. Tais análises foram executadas para solo e água e constituíram-se por: hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) por cromatografia gasosa/infravermelho; benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos (BTEX), por cromatografia gasosa; hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) por cromatografia gasosa e metais (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, V e Zn) por ICP (Inductively Coupled Plasma).

Interpretação/Resultados

A interpretação das seções GPR se deu nos moldes da já consagrada interpretação sismoestratigráfica que aqui será denominada interpretação radar-estratigráfica, devidamente correlacionada às descrições genéticas e granulométricas dos furos de sonda e às descrições geológicas de afloramentos da área. A interpretação dos estilos tectônicos levou em conta as estruturas descritas em afloramentos e aquelas mapeadas em sobrevôo de helicóptero na área de estudo. Tal interpretação permitiu a identificação dos seguintes superfícies, da base para o topo: Superfície Intra-Rocha, a aproximadamente 40m de profundidade na maioria das seções interpretadas, provavelmente correlacionada a uma superfície de alteração; Topo do Basalto/Diabásio; Topo do Argilito e a Superfície Topográfica, interceptando o Solo Residual e,

em alguns casos, o próprio Argilito, em locais onde o Solo Residual não ocorre (Figuras 1 e 2). Foi observado um padrão de fraturamento/falhamento recorrente em todas as seções GPR 2D e 3D interpretadas. Na Figura 2 pode ser observado, em detalhe, o padrão de fraturamento presente no Argilito, corroborado pelas observações e descrições de campo.

Com base na análise estrutural das seções GPR 2D, foi elaborado um mapa de falhas/fraturas apresentando as principais famílias observadas – Figura 06. A direção **F3** (NS) caracterizou-se como uma Zona de Falhamentos com movimentação horizontal e a direção **F2** (NE/SW) como uma Zona de Falhamentos normais. A análise estrutural das fotografias feitas no sobrevôo de helicóptero permitiu posicionar os eventos conforme a sua seqüência evolutiva, sendo que a direção **F1** é alterada pela direção **F2**, ortogonal a **F1**, gerando **F3**, oblíqua a **F1**, indicando movimentação cisalhante ao longo de **F3**. Não foram observados elementos estruturais anteriores a **F1** – Figura 6.

Com relação à aplicação da Eletroresistividade, a análise das Tomografias Elétricas permitiu identificar duas zonas de alta resistividade, sendo a primeira, rasa (0-10m), correlacionada à presença de hidrocarbonetos no solo, e a segunda, mais profunda (acima de 15m), correlacionada à presença de rocha mais resistiva (basaltos/diabásios). As áreas de baixas resistividades relativas foram correlacionadas ao argilito, devido à maior condutividade das argilas. As áreas rasas mais resistivas foram amostradas e analisadas quimicamente – Figura 3 e 5. As regiões mais resistivas e profundas foram interpretadas como correlacionáveis à presença dos basaltos/diabásios, como pode ser demonstrado por furo de sonda mais profundo, 60m, realizado para amarração estratigráfica. Na maioria das amostras foram encontrados valores significativos de TPH (Hidrocarbonetos Totais de Petróleo), como pode ser observado na Figura 8, que apresenta um dos mapas de contorno de isotores de TPH(ppm) por intervalo de profundidade, elaborado para o intervalo entre 3 e 5m. Esse mapa foi obtido através dos resultados das análises geoquímicas efetuadas em amostras de solos, coletadas a partir das sondagens e foi integrado aos mapas geológicos de falhas/fraturas e aos mapas de anomalias elétricas supracitados.

Foi possível, através de tal integração dos resultados, observar a existência de um nítido controle dos sistemas de falhamentos/fraturamentos na migração de hidrocarbonetos, a partir da parte mais alta da área estudada, como pode ser observado nos mapas de falhas/fraturas, nos de Anomalia Elétrica e nos mapas de Isotores de TPH das Figuras 6, 7 e 8.

Com base nos resultados obtidos através da integração dos dados bidimensionais, foi adquirido, na área de maior interesse e para efeito de detalhamento, um volume de dados GPR 3D, com uma área corresponde a um retângulo de 10ha, constituído por células tridimensionais de dimensões 0,50 X 0,40m, que teve por finalidade caracterizar detalhadamente o sistema constituído pelos: Solo Residual/Argilito e Topo do Basalto/Diabásio, que se traduz num sistema argiloso, impermeável no seu todo, porém transmissivo através das superfícies de descontinuidades representadas pelas falhas e fraturas mapeadas.

A Figura 9, traz as seções GPR 3D Inline e Crossline respectivamente, atingindo até 36m de profundidade. São observados os sinais GPR com suas feições de truncamentos para os três sistemas principais: Solo Residual, Argilito e Basalto/Diabásio. As principais falhas/fraturas observadas são verticais, atingindo o Argilito e o Solo Residual e constituem o Sistema de Falhamentos Normais F2. Tal caracterização, propiciou o mapeamento da geometria interna do referido sistema, de modo a permitir a elaboração de mapas detalhados das falhas/fraturas a partir de Depth Slices 3D em profundidades variadas – Figura 10. A análise das amplitudes no Depth Slice da Figura 10, indicou contrastes anômalos correlacionados à presença de hidrocarbonetos, o que pode ser constatado pelos resultados geoquímicos do mapa de isotores apresentado na Figura 8. Cabe ressaltar, a interdependência observada entre o padrão de falhamentos e a migração da pluma de hidrocarbonetos, recorrente, tanto nos mapas geológico/geofísicos, como no mapa geoquímico aqui apresentado.

Foi observado que o sistema de falhas/fraturas é preponderante na condução e direcionamento do óleo vazado. Através das interpretações realizadas nos Depth Slices ou Fatias 3D em profundidade, foi possível verificar que a direção da Família de Falhamentos/Fraturamentos **F2** representa uma direção de condução, ao passo que, a direção de Falhamentos ortogonal à **F2**, representa uma barreira à essa propagação, o que também pode ser constatado pelas trincheiras de inspeção abertas na área – Figura 5.

A Figura 6 apresenta os espectros geoquímicos referentes às amostras de solo coletadas nas sondagens realizadas em diferentes pontos da área. Observa-se uma nítida evolução na degradação do óleo a partir da sondagem 10, em direção à sondagem 26, o que evidencia uma fonte de óleo próxima à sondagem 10. Esse resultado pode indicar uma correlação entre a Zona de Falhamentos **F3**, mapeada e rompimentos de esgoto oleoso subterrâneo, cuja localização é apresentada na mesma figura.

Com relação à água foram gerados o mapa de contorno do NA obtido a partir dos poços instalados, o qual mostrou direção NE-SW predominante para o fluxo, além do mapa de contorno de TPH elaborado a partir das análises geoquímicas obtidas nas amostras de água coletadas. De modo análogo ao que foi observado para o solo, foi possível constatar a existência de um nítido controle dos sistemas de falhamentos/fraturamentos na migração de hidrocarbonetos, a partir da parte mais alta da área estudada.

Conclusões

- As direções de lineamentos observadas nas tomadas aéreas coincidem com as direções de Falhamentos/Fraturamentos mapeados pelos métodos GPR 2D e 3D. Os principais sistemas mapeados foram: Família F2, com direção NE/SW e Família F3, com direção geral NS, essa última, possuindo movimentação horizontal. Falhamentos/Fraturamentos subordinados foram mapeados com direção NW/SE.

- Os horizontes mapeados nas seções GPR refletiram boa correlação com a caracterização geológica observada em afloramentos de campo e com as

sondagens executadas. Os Falhamentos/Fraturamentos mapeados refletem as únicas interfaces permoporosas capazes de conduzir fluidos.

- As tomografias elétricas refletiram padrões de altas resistividades rasas, até 12m de profundidade, correlacionáveis aos teores anômalos de hidrocarbonetos.

- As curvas de valores para TPH refletem nítida correlação com as direções das famílias de falhamentos/fraturamentos F2 e F3, evidenciando através desse fato que F2 e F3 conduzem os fluidos, ao passo que os falhamentos/fraturamentos ortogonais a F2 (NW/SE), barram sua migração.

- O padrão de degradação do óleo crescente a partir da sondagem 10, associado ao mapeamento GPR, indica a existência de fonte recente na chamada Zona de Suprimento de Hidrocarboneto, identificada através da integração de todos os dados, Figuras 6, 7 e 8.

- Os resultados são consistentes, geologicamente coerentes e redundantes, quando observados sob os diferentes aspectos de cada uma das ferramentas empregadas.

- A utilização das ferramentas geofísicas permitiu uma caracterização espacial pormenorizada do meio físico e de seus contaminantes, além de um aumento substancial da base de dados e uma interatividade não atingida pelos métodos convencionais de avaliação, principalmente no que diz respeito à precisão e à visualização tridimensional do espaço analisado.

- A integração das ferramentas Geofísica e Geoquímica, tem se apresentado como a metodologia rasa mais precisa para a avaliação de impacto ambiental causado por acidentes envolvendo hidrocarbonetos e/ou produtos químicos, uma vez que permite visualizar o meio físico e a pluma de contaminantes em subsuperfície, através do delineamento de contrastes físico-químicos das diversas feições que os constituem.

Agradecimentos

À Brain Tecnologia Ltda, pelo incentivo e apoio.

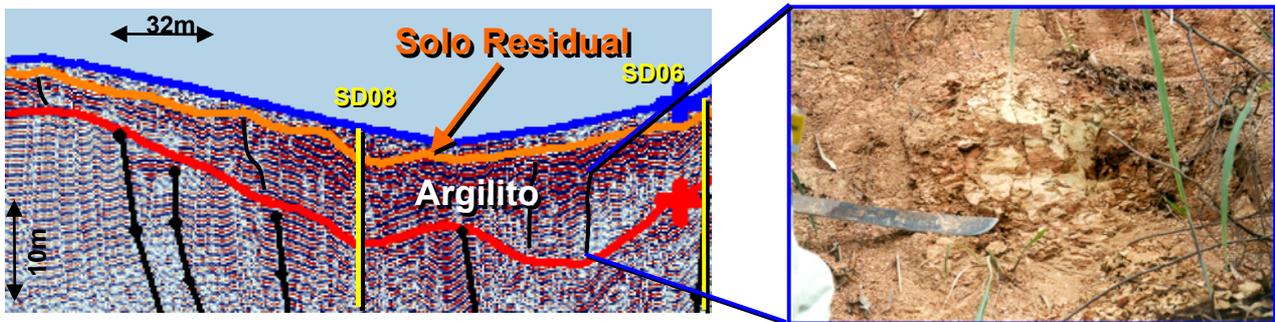
Referências Bibliográficas

- BRAIN Tecnologia Ltda (2002)
Relatórios Técnicos.
- DAVIS, J. I.; ANNAN, A.P.(1989) Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysics*, V.37,N3.pp.531-551.
- FISHER, E.; MCMECHAN G. A. & ANNAN, A. P. (1992) Acquisition and Processing of Wide-Aperture Ground Penetrating Radar Data. *Geophysics*, V.57, N3. pp.495-508.
- MAGALHÃES, C. C. (1998) O Ground Penetrating Radar e seu Uso na Avaliação Geológica de Sítios para Implantação de Barragens. Comitê Brasileiro Para a Construção de Hidrelétricas.



SEÇÃO TIPO REPRESENTATIVA DA GEOLOGIA LOCAL

Fig 1: Seção Tipo.



DETALHE DE AFLORAMENTO ARGILITO FRATURADO

Fig 2: Seção GPR 2D apresentando o mesmo padrão de fraturamento observado no afloramento de argilito.

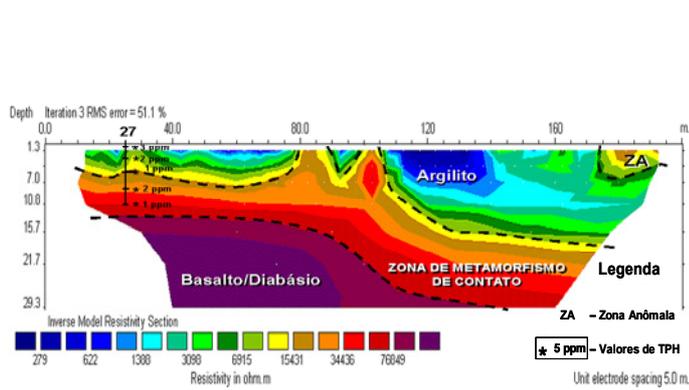


Fig 3: Seção de tomografia Elétrica

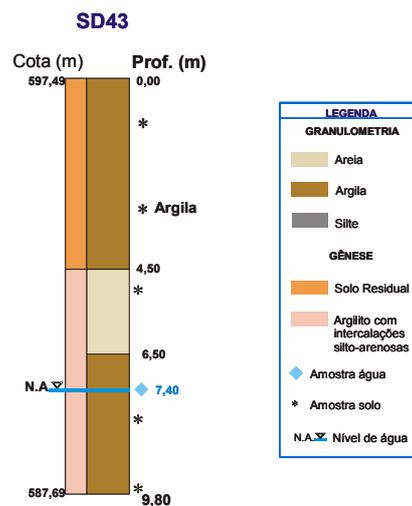


Fig 4: Descrição de furo de sonda.

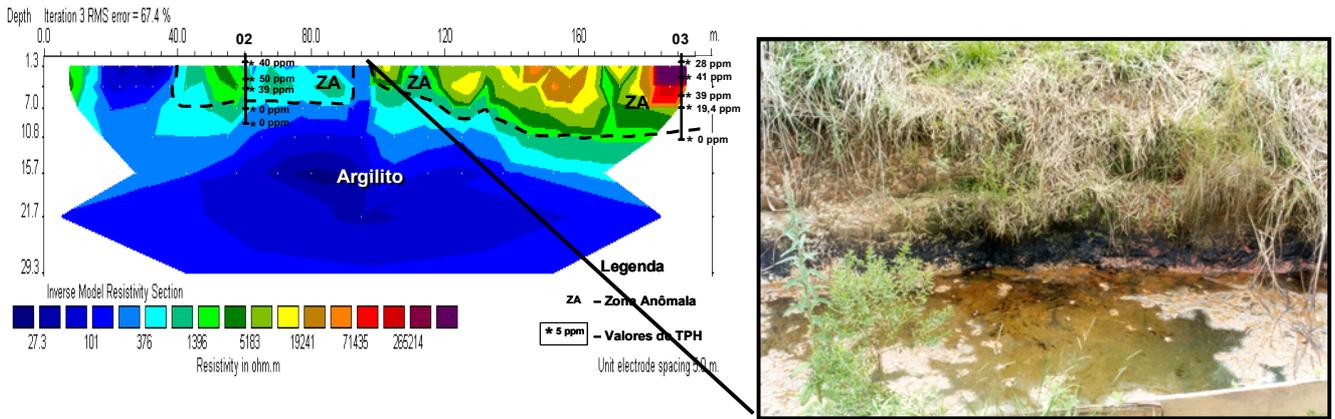


Figura 5: Seção de tomografia Elétrica ao longo de uma trincheira com vazamento de hidrocarbonetos.

TRINCHEIRA COM ÓLEO NO SOLO E NA ÁGUA

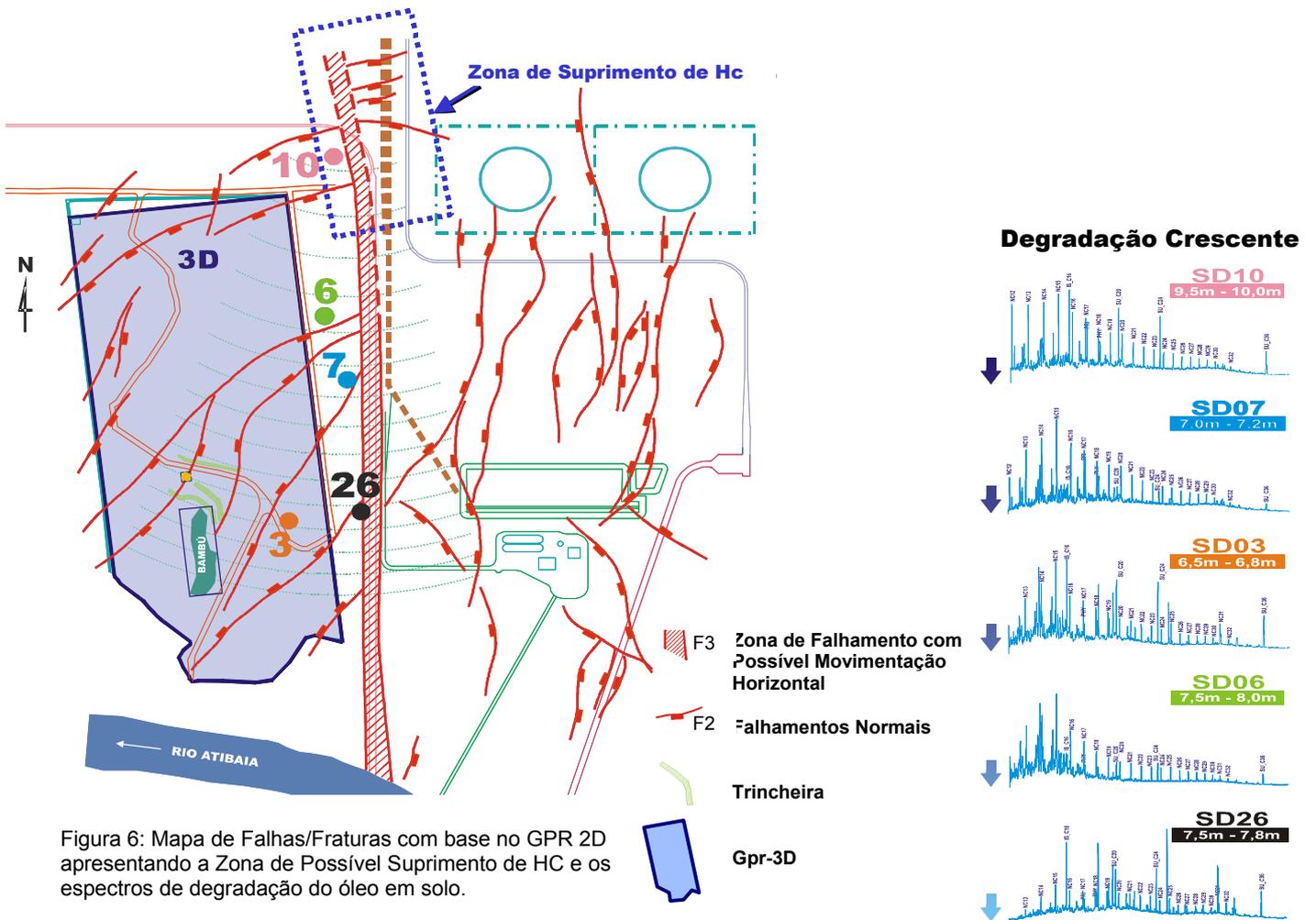


Figura 6: Mapa de Falhas/Fraturas com base no GPR 2D apresentando a Zona de Possível Suprimento de HC e os espectros de degradação do óleo em solo.

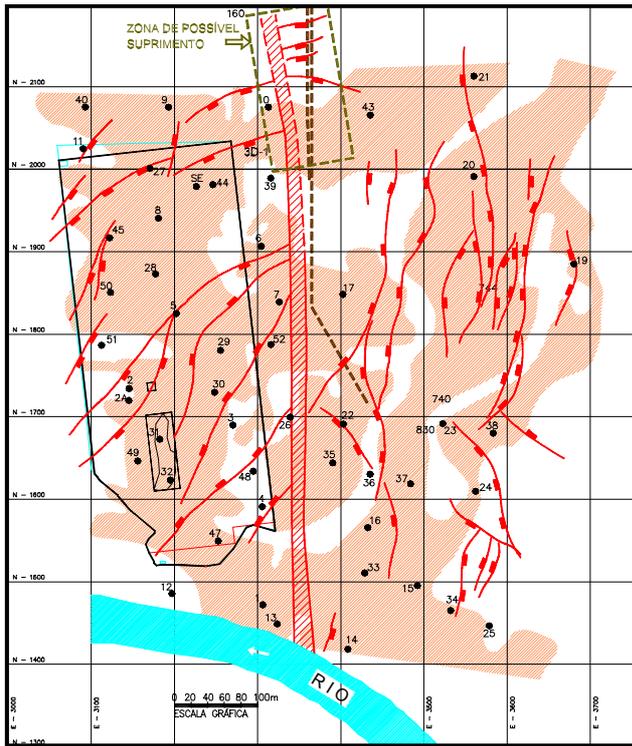


Figura 7: Mapa Anomalia de Alta Resistividade Elétrica.

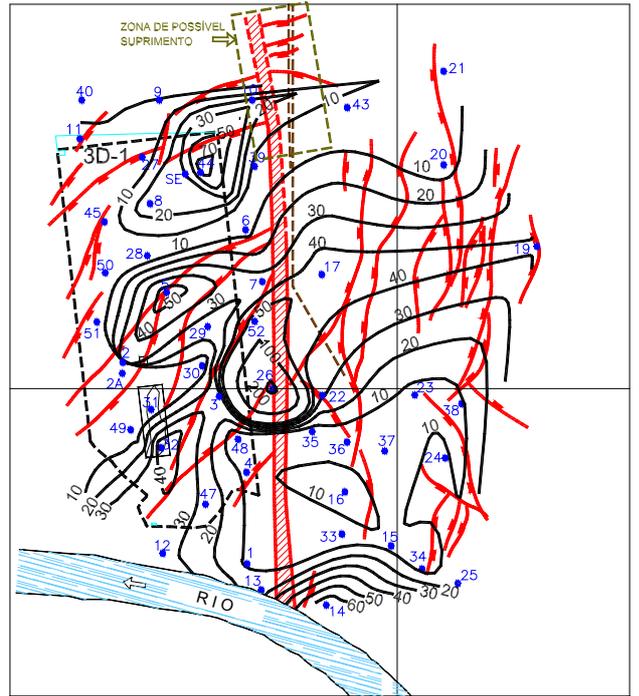


Figura 8: Mapa de Isoetes de TPH (ppm) no intervalo de 3 a 5m de profundidade.

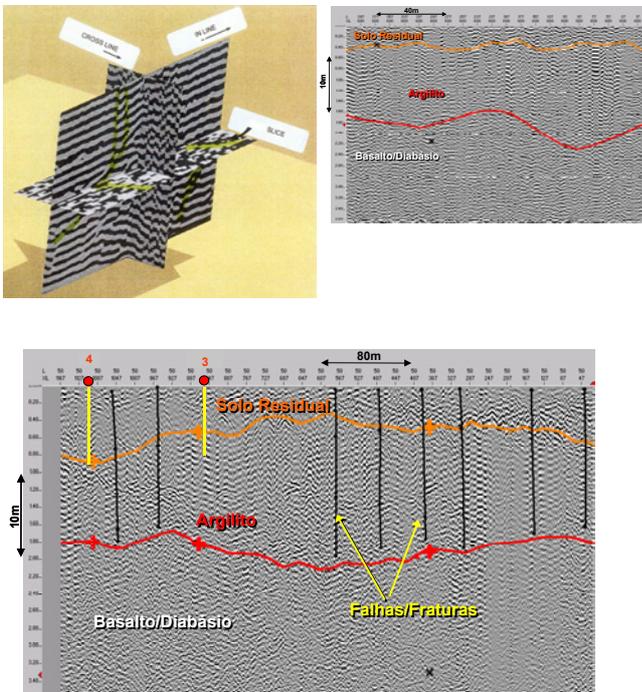


Figura 9: Inline e Crossline do volume de dados GPR 3D.

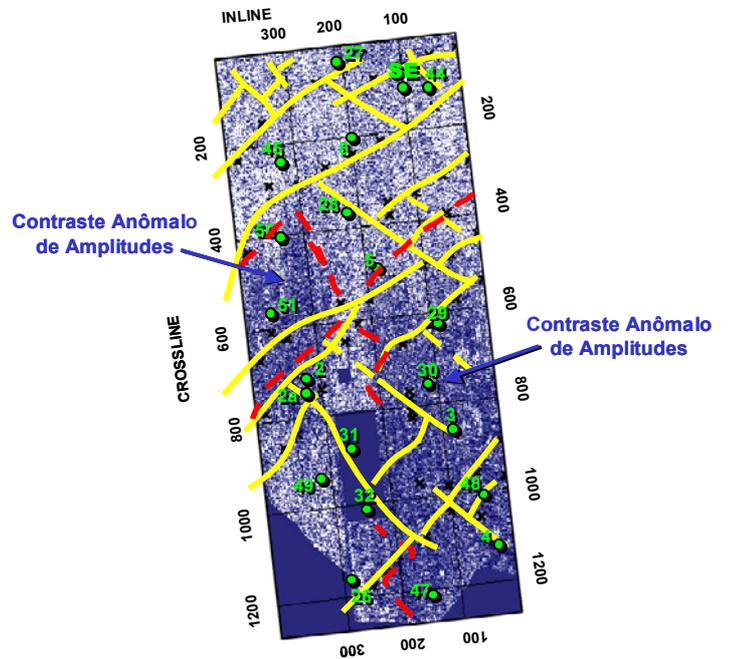


Figura 10: Depth Slice a 4m de profundidade mostrando o contraste anômalo de amplitudes e sua correlação com a presença de hidrocarbonetos no solo.