



GPR APLICADO A ESTUDOS DE CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS

Jamile Dehaini
Hidrogeofísica

RESUMO

O fato de contaminantes orgânicos moverem-se em subsuperfície de maneira dispersa e descontínua torna o mapeamento destes por métodos diretos difícil e em geral deficiente. Foi realizada uma avaliação da aplicabilidade do GPR (Ground Penetrating Radar) neste tipo de estudo em condições consideradas difíceis do ponto de vista do método. A metodologia constituiu-se de levantamento de campo com o GPR, execução de processamento dos dados, interpretação dos radargramas processados e sondagens a trado em locais sem contaminação e suspeitos de contaminação de acordo com a interpretação para confirmação da mesma. As seções de GPR apresentaram anomalias na forma de "ausência" de reflexão de sinal denominadas por "zonas de sombra" ou "apagação". A "ausência" de reflexão. Apesar das condições adversas de campo, o método GPR possibilitou a delimitação da pluma de contaminação além da extensão detectada inicialmente por métodos diretos, o que mostra sua aplicabilidade e eficiência na detecção deste tipo de contaminação.

1. INTRODUÇÃO

Estudos hidrogeológicos têm mostrado que os mecanismos de dispersão e migração dos hidrocarbonetos são complexos, o que torna difícil estimar adequadamente a quantidade ou continuidade destes produtos em subsuperfície, utilizando apenas poços de monitoramento (Freeze & Cherry, 1979; Mackay *et al.*, 1985; Cherry, 1987; Domenico & Schwartz, 1990). Portanto, a aplicação de um método geofísico contribuiria para delinear a pluma de contaminação nestes casos.

Os hidrocarbonetos no meio físico natural podem proporcionar contrastes dos parâmetros eletromagnéticos sob a aplicação de um campo eletromagnético de alta frequência. A variação destes parâmetros faz do GPR uma importante ferramenta para mapear os hidrocarbonetos. Geralmente, os casos estudados na literatura são provenientes de experimentos controlados, nos quais se conhece o sinal antes e depois da contaminação, ou condições quase ideais para aplicação do método do ponto de vista litológico (geralmente constituição arenosa para proporcionar boa penetração do sinal), lâmina de hidrocarbonetos relativamente espessa e locais com baixíssimo nível de ruído externo. A realidade na maioria dos casos é muito diferente das condições idealizadas que geralmente se apresentam nas pesquisas. O local de estudo localiza-se na cidade de São Paulo, a qual possui postos de serviços espalhados generalizadamente, mas do ponto de vista geológico, em geral, tem predominância argilosa nos seus primeiros metros de subsuperfície. Vivemos em um

país que diferentemente dos países que já aplicaram o método com esse objetivo, tem mão de obra muito barata e, portanto facilita a construção de muitos poços de monitoramento. Estes fatores tornam a utilização do GPR para detecção deste tipo de contaminação em São Paulo, Brasil, uma metodologia economicamente questionável. Por outro lado, muitas vezes se nota o vazamento através de uma explosão ou iminente risco de incêndio o que torna a detecção da pluma um caso de emergência nem sempre possível de resolver com a execução de poços aleatoriamente distribuídos. Após o bombeamento e extração da fase livre, permanecem a fase vapor e residual no meio, as quais são fontes permanentes de contaminação das águas subterrâneas e difíceis de serem mapeadas unicamente através de sondagens e poços de monitoramento.

1.1 Objetivo

Avaliar a aplicabilidade do radar de penetração para detectar contaminação em subsuperfície, proveniente de vazamento de tanque subterrâneo de armazenamento de gasolina, em uma condição desfavorável do ponto de vista prático. Os principais aspectos desta condição seriam litologia argilosa, destituída de fase livre do produto no poço (fase de pós-bombeamento) e local com ruídos externos;

2. MÉTODO GPR

As propriedades eletromagnéticas de materiais geológicos são controladas principalmente pelo conteúdo de água (Topp *et al.* 1980). As águas presentes na natureza, em geral, apresentam condutividade elétrica apreciável, pois sempre têm algum sal dissolvido. No caso das rochas, todas possuem poros e/ou fissuras em proporção maior ou menor, as quais podem estar ocupadas total ou parcialmente por eletrólitos, resultando em conjunto um comportamento de condutor iônico, com resistividade muito variável (Orellana, 1982). A constante dielétrica da água é outra propriedade eletromagnética que pode proporcionar grandes contrastes em relação a outros materiais do meio (Topp *et al.*, 1980).

As variações nas propriedades eletromagnéticas do solo estão geralmente associadas a essas diferenças, as quais, por sua vez, causam reflexões e atenuações do sinal transmitido a partir do GPR. O sinal refletido é detectado pelo receptor onde é amplificado, digitalizado e registrado em um meio magnético digital para processamento e exibição de dados.

A velocidade e a atenuação são os fatores que descrevem a propagação de ondas de rádio de alta frequência no solo. Como já foi visto anteriormente, para descrever as propriedades eletromagnéticas de altas frequências dos materiais utiliza-se a constante dielétrica, ou permissividade relativa. Um texto base que deve ser consultado por quem deseja compreender o método do ponto de vista teórico é de Davis & Annan (1989).

A condutividade elétrica dos materiais do solo ou rocha provoca significantes perdas de propagação do sinal conforme seu valor aumenta devido à absorção de energia, o que limita a profundidade de penetração.

A permissividade relativa, ou constante dielétrica, de cada material ou substância em subsuperfície é o fator que proporciona os contrastes e torna possível a detecção de contaminantes orgânicos pelo método do GPR. Reflexões a partir de hidrocarbonetos nos interstícios do solo são uma função do contraste de permissividade entre o hidrocarboneto e o material "hospedeiro". Na prática, um contraste detectável depende dos contrastes relativos entre as diferentes composições do solo e componentes líquidos presentes na interface. Os valores para LNAPLs geralmente são baixos, os quais não devem proporcionar um contraste muito alto com a maioria das areias e pedregulhos secos, mas devem ter um bom contraste com solos argilosos, arenosos e com a água.

O modelo intuitivo geoeletrico para plumas de contaminação por hidrocarbonetos trata a pluma como um corpo resistivo em subsuperfície, pois essas substâncias são apolares. No entanto, resultados de estudos de campo têm mostrado que o corpo da pluma pode desenvolver atributos condutivos através do tempo devido a processos de biodegradação (Sauck *et al.*, 1998; Werkema *et al.*, 2000).

Apesar da tecnologia do GPR ter sido viabilizada recentemente (década de 70), o processamento de dados é um assunto tratado de maneira intensiva, já que o desenvolvimento de técnicas de processamento e os "softwares" da sísmica são aplicáveis no que se refere à parte cinemática de tratamento de dados neste caso. Como pode-se observar na literatura sobre GPR, toda a linguagem técnica como também técnicas de aquisição e processamento de dados foram herdadas da literatura de sísmica.

Os registros de campo contêm (a) reflexões, (b) ruído coerente (c) ruído ambiente aleatório e, eventualmente, (d) ruído instrumental. Um importante aspecto do processamento de dados é discernir as reflexões genuínas (devido a interfaces litológicas) dos vários tipos de ruídos.

3 Descrição da área

O estudo foi realizado em um posto de serviço, localizado no Bairro da Freguesia do Ó, no limite da região oeste/norte da cidade de São Paulo (Figura 1). O posto de serviço é rodeado por residências e estabelecimentos comerciais. Localiza-se aproximadamente a 400 metros a montante do Rio Tietê apresentando uma sutil declividade em direção ao mesmo.

A área de estudo situa-se sobre depósitos sedimentares aluviais associados ao Rio Tietê, de idade Quaternária (Qa), de predominância areno-argilosos. Localmente, a descrição litológica foi feita a partir das quatro sondagens a trado manual (F-1, F-4, F-6 e F-7), executadas para averiguação da interpretação dos perfis de GPR. Basicamente, o posto situa-se sobre um aterro com material heterogêneo, cuja espessura varia de 0,80 a 1,36 metros. A camada subjacente é caracterizada por

uma argila plástica, com espessura variando de 1,1 a 2,2 metros, aproximadamente.

Baseado nas informações obtidas a partir dos poços de monitoramento, poços de remediação e sondagens a trado, concluiu-se que na área e na profundidade de interesse ocorre um único aquífero de caráter livre, composto por sedimentos de predominância argilosa. A profundidade do nível d'água em março de 1997 variava de 1,38 a 2,25 metros (Hidroplan, 1997). Já em janeiro de 2001 a profundidade do nível d'água variou entre 0,66 a 2,07. O baixo gradiente hidráulico apresentado faz com que o sentido do fluxo das águas subterrâneas se inverta facilmente.

3.1 Caracterização da contaminação

Hidroplan (1997) observou que: 1) nas leituras do nível de fase livre em março de 1997, um dos poços apresentou lâmina de gasolina na forma de fase livre, antes de iniciar o processo de bombeamento; 2) durante a perfuração dos poços era perceptível o odor de combustível na maior parte dos casos; 3) na mesma época foram feitas análises cromatográficas de BTX, sendo que os resultados indicaram presença de contaminantes em alguns poços.

No dia 20 de outubro de 1998 houve uma inspeção da CETESB (São Paulo, 1997), na qual foi observada fase livre em alguns poços. Em outra inspeção da CETESB no dia 12 de novembro de 1998 (São Paulo, 1997) foi observada fase livre do produto em alguns poços e nível de explosividade de 100% na maioria dos poços (São Paulo, 1997). Durante o primeiro levantamento de dados com o GPR (5 de julho de 2000) alguns poços apresentaram fase livre do produto.

3.2 Instrumentação

O instrumento utilizado na pesquisa foi o RAMAC produzido pela MALÁ - GeoScience. Basicamente é constituído de uma unidade de controle RAMAC/GPR, antenas transmissoras e receptoras de várias frequências, cabos de conexão de fibra óptica, baterias individuais de alimentação para as unidades eletrônicas, cabo paralelo de dados, um "notebook" para aquisição de dados e o software de aquisição de dados RAMAC2, versão 2.28 (1997). O software utilizado para processamento dos dados adquiridos pelo RAMAC/GPR foi o RADPRO (Radar Processing Software) versão 2.25 (1996).

4. Levantamento de dados de GPR

O levantamento de campo foi realizado em duas fases: uma primeira fase (05/07/2000) e outra posterior (15 a 19/01/2001). Na primeira fase foram executadas 9 linhas (P-1 a P-9) totalizando em 585 metros com medidas a cada 0,1 metro e resultando 5830 traços, com a antena blindada de frequência central 250MHz. Foram realizadas duas sondagens CMP para análise de velocidade ao longo do perfil P-1, com afastamento inicial de 0,2m.

A segunda fase foi constituída da repetição de dois perfis da fase I (P-1 e P-6) e execução de cinco novos perfis. Também foram realizadas três sondagens CMP (CMP-3, CMP-4 e CMP-5) e uma WARR, sendo esta última

realizada no mesmo ponto da CMP-5. Neste caso o total de traços foi de 8690 em 934 metros de extensão. A Figura 7 apresenta os perfis do levantamento.

5. Interpretação

Durante o processamento procurou-se identificar contrastes que poderiam ser indícios de contaminação. Neste caso a imagem típica que ocorreu foi a de "ausência" de sinal, na literatura em geral denominada por "zona de sombra" ou "apagão" (Nash *et al.*, 1997; Bermejo *et al.*, 1997; Aquino *et al.* 1998). Então a interpretação sobre os perfis feita a seguir se referirá a "zona de sombra" ou "apagão" quando se tratar de anomalia no sinal referente à contaminação.

A partir das seções processadas, foi feita uma interpretação de maneira visual e traçado um mapa delineando a pluma de contaminação de maneira qualitativa (Figura 7).

5.1 Interpretação das seções tempo-distância dos caminhamentos de reflexão

As figuras 1 e 2 são exemplos de radargramas que apresentaram as "zonas de sombra", as quais são interpretadas no estudo como indício de contaminação por gasolina. As anomalias ocorreram principalmente entre 30 e 60ns.

Na Figura 3 é possível visualizar radargramas que foram considerados como representativos do "background" na área de estudo, pois nestes casos não se observa "zona de sombra".

Outra observação interessante deve ser feita sobre os perfis como os da Figura 2, os quais mesmo sendo feitos dentro da área do Posto, cujo piso é construído com malha de ferro e concreto de 40cm de espessura, foi possível visualizar a "zona de sombra".

Os perfis repetidos nas duas fases, mas executados com empilhamentos diferentes como se exemplifica na Figura 1, indica uma "zona de sombra" mais abrangente, conforme o aumento do empilhamento. O mesmo pode ser observado em outros perfis.

5.2 Interpretação da análise espectral

As análises de espectro feitas com intuito de verificar e comparar o comportamento do sinal relacionado à contaminação com sinal relacionado à não contaminação (após as seções terem sido processadas).

Foram produzidos três grupos de gráficos para cada perfil que apresentou "zona de sombra" de forma mais evidente. Um grupo de gráficos representa a análise espectral feita para toda seção em três períodos de tempo diferentes (0-30, 30-60 e 60-100ns) subdivididos de acordo com a ocorrência da "zona de sombra", predominantemente entre 30 e 60ns. Um segundo grupo é constituído pela análise espectral feita sobre o trecho de traços que apresentou "zona de sombra" e para os mesmos períodos analisados no grupo anterior. Um terceiro grupo de gráficos representa a análise espectral feita em trecho desprovido de contaminação, ou seja, sem "zona de sombra". As figuras 4, 5 e 6 são exemplos dessas análises, respectivamente.

Analisando os gráficos a principal observação é que as análises feitas sobre a parte contaminada mostram que a

freqüência de maior amplitude praticamente se mantém igual do ponto de vista energético nos dois últimos períodos analisados (30-60ns e 60-100ns). Como comparação, quando essa mesma análise é realizada sobre o grupo de traços correspondentes à área não contaminada (sem "zona de sombra") ocorre uma diminuição de amplitude relativamente grande no último período de tempo (60-100ns), comportamento similar ao da seção inteira.

6. Análise dos dados

A ausência de refletores na maior parte das sondagens CMP, com exceção da CMP-1 feita sobre local não contaminado, pode ser considerada como um indício da contaminação em subsuperfície.

De acordo com a interpretação feita a partir das seções dos perfis levantados nas duas fases com a antena blindada de 250MHz foi possível delinear a pluma de contaminação na área de estudo como pode ser visto na Figura 7. Com este esboço sugere-se que a pluma de contaminação é maior do que a indicada por métodos diretos, estendendo-se para parte sudoeste da área de estudo.

A partir da interpretação foram feitas sondagens a trado para confirmação da mesma. Então, foi possível verificar o acerto da interpretação, pois a sondagem F-1 feita na parte interpretada como não contaminada do perfil P-1 realmente não apresentou indícios de contaminação ao longo da mesma. Já as sondagens F-4, F-6 e F-7, localizadas em trechos interpretados como contaminados apresentaram indícios de contaminação. A constatação da contaminação nestas sondagens foi feita pelo odor nas amostras de solo. A sondagem F-4 também apresentou fase livre de gasolina.

O fato da ocupação do contaminante no meio poroso em subsuperfície simultaneamente à "retirada" parcial da água desse meio (Oliveira, 1997) pode ter causado uma "homogeneização" do ponto de vista eletromagnético, pois materiais geológicos desprovidos de água possuem constante dielétrica baixa ao mesmo tempo a constante dielétrica da gasolina é baixa. Desta forma, a homogeneização do meio é causada pela diminuição da constante dielétrica e faz com que a propagação do sinal não sofra reflexões, o que explicaria a ausência de sinal na parte contaminada das seções.

Sobre a parte oeste da pluma, cujo desenho de uma linha retilínea não é comum nesse tipo de estudo, pode ser explicada pela existência de uma caixa subterrânea no local que provavelmente recebe o contaminante e limita a sua ocorrência em subsuperfície.

A análise espectral feita de modo a comparar o comportamento do sinal em trechos que apresentaram "zona de sombra", tanto espacialmente como temporalmente, mostra que o conteúdo energético do sinal não sofre mudanças significativas como ocorre nos trechos que não apresentam "zona de sombra".

A manutenção de conteúdo energético até o final da seção em tempo na parte correspondente à contaminação provavelmente ocorre devido à homogeneização do meio com a presença de hidrocarbonetos e, conseqüentemente, o sinal se

propaga "sem" reflexões. Neste caso não há perda de energia pois, além do pulso não ser refletido de volta para a superfície, o meio se torna mais resistivo eletricamente em função da presença do hidrocarboneto e retirada de parte da água, o que pode explicar as observações feitas na análise espectral.

A análise feita foi baseada na interpretação visual da contaminação nas seções e proporcionou bons resultados, possibilitando diferenciar na análise espectral os contrastes detectados qualitativamente.

9. Conclusões e recomendações

Na pesquisa desenvolvida aqui, pode-se afirmar que a presença de hidrocarbonetos em subsuperfície causou anomalia na seção do GPR na forma de "ausência" do sinal, denominada por "zona de sombra" ou "apagão" apesar das condições desfavoráveis para aplicação do método. As sondagens executadas em locais interpretados como contaminados (F-4, F-6 e F-7) e não contaminado (F-1) confirmaram as suspeitas da interpretação.

A constituição litológica de predominância argilosa, não afetou a possibilidade de detecção do contaminante em subsuperfície. Por um lado a presença do contaminante de característica resistiva proporciona contraste em relação à argila e água como também menor atenuação, por outro lado a possibilidade do contaminante expulsar parte da água dos poros causa a homogeneização do meio do ponto de vista eletromagnético, o que explicaria a ausência de reflexão na parte contaminada.

No caso estudado a ocorrência de fase livre nos poços e sondagens é praticamente nula, no entanto o odor de contaminante é forte em poços e sondagens (fase vapor) como nas amostras das sondagens (fase adsorvida, vapor e residual), o que nos leva a concluir que provavelmente a contaminação no local, na época do levantamento, apresentava-se na forma de fase vapor, adsorvida, residual e dissolvida. Enfim, a complexa distribuição do contaminante em subsuperfície se manifesta nas seções do GPR.

Quanto ao fato da área de estudo ser constituída de vários elementos que contribuem para produzir um alto nível de ruído externo, não impediu a utilização do método, já que foram utilizadas antenas blindadas. Com a utilização de antenas não blindadas para execução de sondagem CMP também foi possível observar "zona de sombra" sendo que somente a CMP-1 executada em área isenta de contaminação proporcionou a formação de um refletor.

A possibilidade de detecção de hidrocarboneto em subsuperfície foi produto de uma conjunção entre a escolha de antenas blindadas, a definição dos parâmetros de aquisição e o processamento aplicado aos dados.

Neste caso o compromisso resolução x profundidade foi resolvido com a antena de 250MHz. A definição dos parâmetros de aquisição adotou como base teórica a orientação dada no manual (Ramac, 1998) e as diretrizes sugeridas por Annan (1992), sendo que a partir daí executou-se uma linha teste para verificação da resposta do sinal para aquele meio. Além disso, na área de estudo experimentou-se "stacking" de 128 e posteriormente de

256 para observar se ocorria intensificação do sinal. Neste caso, o "stacking" maior foi desvantajoso uma vez que além de não proporcionar ganho qualitativo, duplica o tempo de levantamento. Isto não significa que em outras áreas a utilização de "stacking" maior não proporcionaria um ganho de qualidade. A escolha dos parâmetros de aquisição é específica para cada caso estudado, sendo definida através de uma linha teste, procedimento padrão para este tipo de levantamento.

O processamento aplicado aos dados foi simples o qual adotou como base eliminar os ruídos, compensar a perda de energia do sinal e corrigir o tempo zero nas seções. A seção final é resultante de vários testes de processamento para cada passo. Portanto, não existe uma receita única sendo necessário para cada situação um processamento diferente.

Finalmente, conclui-se que o método é aplicável e eficiente para estudos de contaminação em subsuperfície proveniente de vazamentos de tanques de armazenamento em postos de serviço, pois, na pior condição do ponto de vista teórico, foi possível detectar a contaminação e delinear a pluma além da extensão indicada por métodos diretos.

Um passo interessante que comprovaria ou não as hipóteses seria a produção de modelos sintéticos que simulassem as hipóteses sugeridas e assim poderiam ser comparados com as seções levantadas como também contribuiriam na compreensão da interação física do contaminante com o meio.

10. Referências bibliográficas

- ANNAN, A.P. (1992) Use and techniques of GPR in near surface geophysics. **Society of Exploration Geophysicists**. Workshop Notes, Sensor & Software Inc. 110p
- AQUINO, W.F.; DEHAINI, J.; MENDES, J.M.B. (1998) Geo-Radar para detecção de contaminação por hidrocarboneto. Anais do **II Workshop de Geofísica Aplicada**. Rio Claro, SP. (CD-ROM)
- BERMEJO, J. L.; SAUCK, W. A.; ATEKWANA, E. A. (1997) Geophysical discovery of a new LNAPL plume at the Former Wurtsmith AFB, Oscoda, Michigan. **Ground-Water Monitoring Review**. Fall, p 131-137.
- CHERRY, J.A. (1987) Groundwater contamination by petroleum products. Paper presented at the **Twelfth World Petroleum Congress**. Houston, Texas. p 115-123.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. (1989) Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v 37, p. 531-551.
- DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W. (1990) **Physical and chemical hydrogeology**. John Wiley & Sons, Inc. Singapore. 824p.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. (1979) **Groundwater**. Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 604p
- HIDROPLAN - Hidrogeologia e Planejamento Ambiental S/C Ltda (1997) **Lauda técnico de avaliação sobre a situação de contaminação em área próxima ao Auto**

- Posto na Freguesia do Ó, São Paulo, SP.** (Cliente confidencial).
- MACKAY, D.M.; ROBERTS, P.V.; CHERRY, J.A. (1985) Transport of organics contaminants in groundwater. **Environmental Science Technology.** v 19, n5, p 384-392.
- NASH, M.S.; ATEKWANA, E.; SAUCK, W.A. (1997) Geophysical investigation of anomalous conductivity at a hydrocarbon contaminated site. **Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP).** v 2, p 675-683.
- OLIVEIRA, E. (1997) **Ethanol flushing of gasoline residuals - microscale and field scale experiments.** Tese de Doutorado em Ciências da Terra, Universidade de Waterloo, Canadá. p 297
- ORELLANA, E. (1982) **Prospeccion geoelectrica en corriente continua.** Madrid, Editora Paraninfo. 578p.
- RADPRO (1996) Manual do software de processamento de dados do GPR RAMAC na versão 2.25. **Malä-Geoscience.** 52p
- RAMAC/GPR (1997) Manual do instrumento na versão 2.28. **Malä-Geoscience.** 65p
- RAMAC/GPR (1998) Software versão 2.49/BETA. **Malä-Geoscience.**
- SÃO PAULO (Estado). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1997) **Processo 29-00237-97.** CETESB
- SAUCK, W.A., ATEKWANA, E.A., NASH, M.S. (1998) High conductivities associated with na LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics.** v 2, n 3, p 203-212.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. (1980) Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research.** v 16, n 3, p 574-582
- WERKEMA, Jr., D.D.; ATEKWANA, E.; SAUCK, E.; ROSSBACH, S.; DURIS, J. (2000) Vertical distribution of microbial abundances and apparent resistivity at an LNAPL spill site. **Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP),** p 669-678

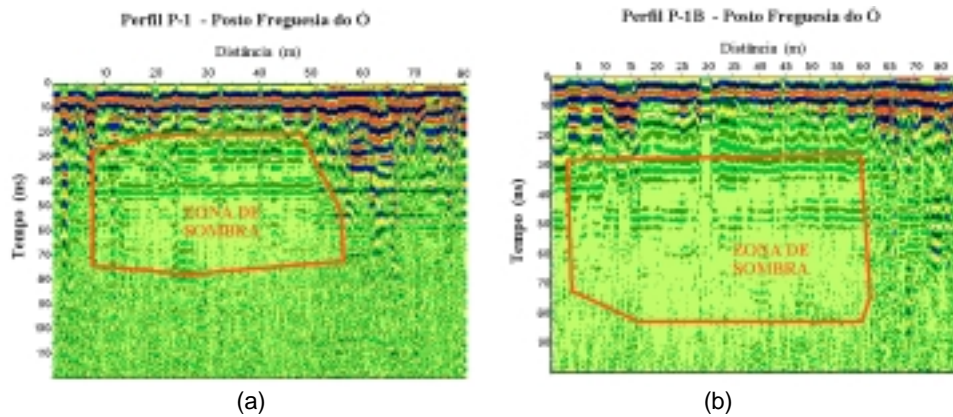


Figura 1 – Radargramas com zona de sombra do mesmo perfil sendo : a) “stacking”=128 e b) =256

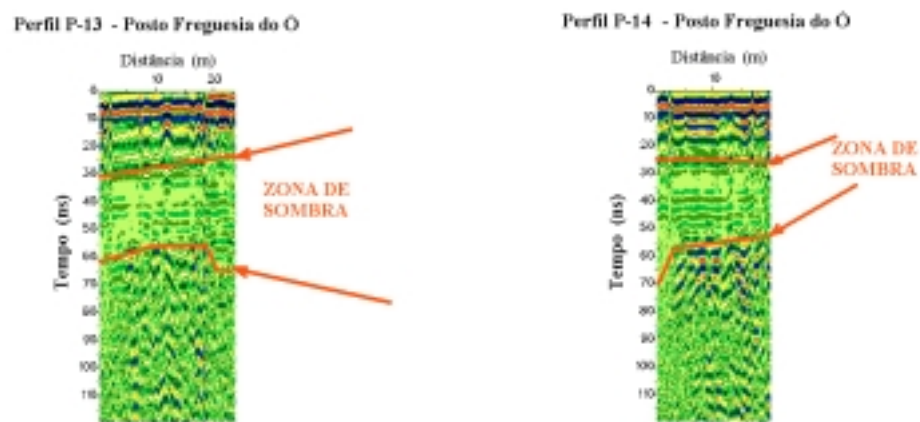


Figura 2 - Radargramas apresentando “zona de sombra” mesmo com piso constituído de malha de ferro.

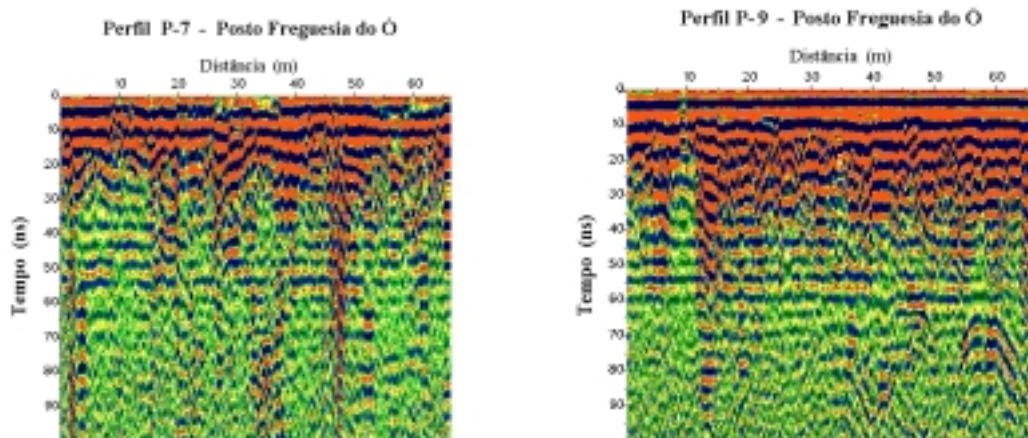


Figura 3 – Radargramas sem anomalia relacionada à contaminação

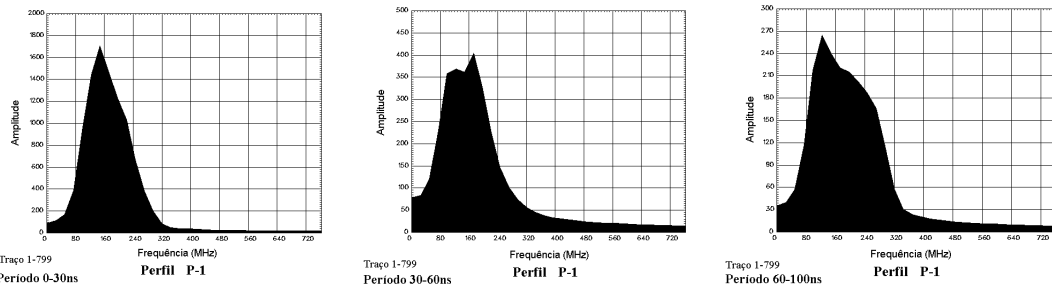


Figura 4 - **Análise espectral do perfil P-1 inteiro** (O comportamento do espectro para o perfil todo é o esperado, ou seja, conforme se avança no tempo a energia vai diminuindo).

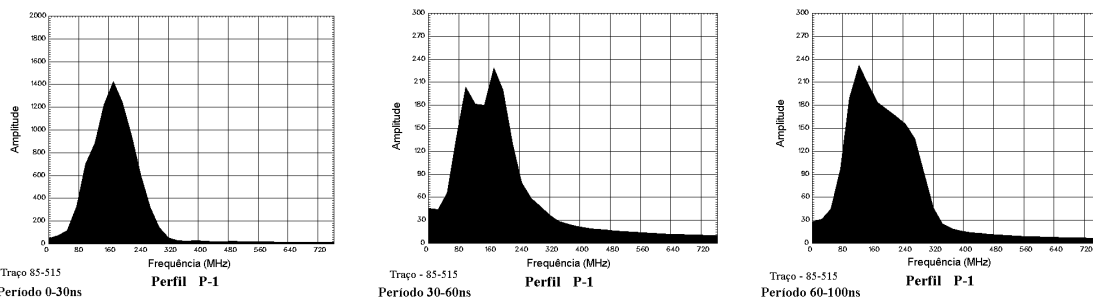


Figura 5 - **Análise espectral do trecho da seção do perfil P-1 correspondente à área supostamente contaminada** (1.energia de retorno menor comparado com os espectros dos outros trechos = atenuação; 2.comparando com o comportamento dos espectros de períodos diferentes para o trecho supostamente contaminado houve um “ganho” de energia no tempo final. (não houve perda de energia)).

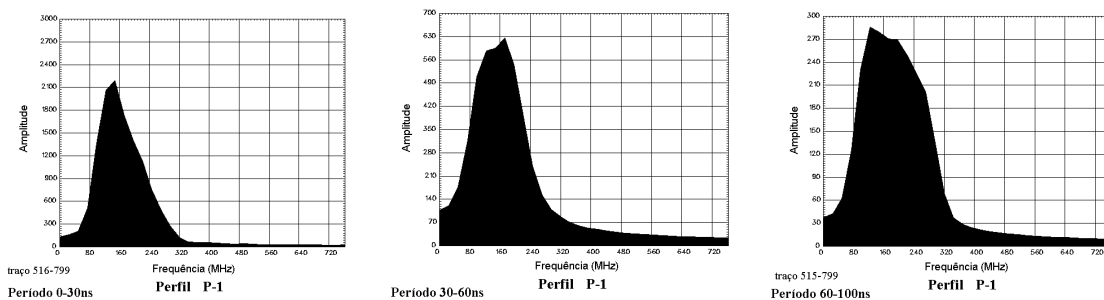


Figura 6 - **Análise espectral do trecho da seção do perfil P-1 correspondente à área não contaminada** (Apresenta o mesmo comportamento do perfil inteiro mesmo sendo argila).

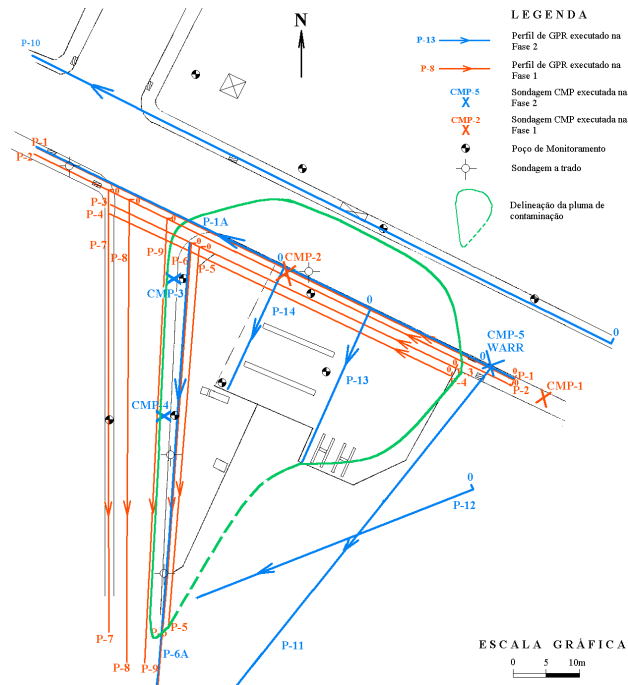


Figura 7 – Esboço da área de estudo com delimitação da pluma de contaminação de acordo com interpretação visual dos dados de GPR