



# INTEGRANDO INFORMAÇÕES DE GPR, MODELAGEM GEOESTATÍSTICA E DE FLUXO E TRANSPORTE DE MASSA EM ESTUDO DE CASO AMBIENTAL.

Rui Cesar Sansonowski, Armando Zaupa Remacre, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> 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.

## Abstract

A current problem in environmental investigation is the estimation of pollution extent. This is usually done on the basis of point measurements performed at selected locations. These data are then used to assess values at unsampled locations. There are many methods available for this purpose. The goals of this paper are: to present some geostatistical methods, which can efficiently use available additional information for the estimation, and to present the GPR (Ground Penetrating Radar) as an important tool for geology interpretation. The information available consists of a 3D GPR survey (soft data); the geological characterization through 34 observation wells (hard data) and the content of total petroleum hydrocarbon (TPH) from water analyses in a real impacted area. The geostatistical approaches were made using Ordinary Kriging (OK), Kriging with External Drift (KDE), Collocated Cokriging and the Stochastic Simulation (Sequential Gaussian Simulation). After the geological model of the contaminated area was envisaged, the next step was aimed at quantifying the run off and the mass transportation in groundwater area. A numerical modeling was used to predict the behaviour of groundwater flow and mass transport with the advent of future simulator packages based in finite-difference grid. The final results revealed areas with relatively larger environmental risk to the human exposition and the evolution of the contamination plume in 50 years in the area called 'Alagado' 4.

## Introdução

Nos últimos anos, a sociedade brasileira vem assistindo a um grande número de ocorrências de acidentes ambientais, o que tem tornado as ações contra as agressões ao meio ambiente muito mais criteriosas.

A partir da promulgação da Lei no 9.605/1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas para condutas lesivas ao meio ambiente, os responsáveis pela defesa ambiental passaram a contar com um instrumento de responsabilização criminal da pessoa jurídica e penalizações de corporações que atuam em detrimento do meio ambiente.

Neste novo contexto, os acidentes ambientais devem ser cuidadosamente diagnosticados e avaliados, quanto aos

impactos, através de estudos de natureza geoquímica, geofísica, modelagem geológica e de fluxo e transporte de contaminantes em solos e águas subterrâneas, procurando descortinar medidas mitigadoras e alternativas para a correta implementação dessas ações junto aos órgãos ambientais.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso especialmente desenvolvido para auxiliar a compreensão e avaliação de uma área impactada por derramamento de petróleo, analisar o risco ambiental e propiciar subsídios para a elaboração de um projeto de descontaminação. O estudo se propõe a integrar e interpretar fotografias aéreas, dados de GPR (Ground Penetrating Radar) e dados geológicos, para, finalmente, propor um modelo geológico da área e modelar o fluxo e o transporte do contaminante na zona saturada.

## Localização e Identificação do Acidente

O acidente ambiental ocorrido em julho de 2000, em uma área industrial localizada no município de Araucária, região metropolitana de Curitiba, constitui o problema a ser estudado. Neste local, ocorreu o vazamento de aproximadamente 4 milhões de litros de petróleo. Parte deste contaminante foi retida em uma área denominada Alagado 4, designação efetuada pela equipe de coordenação da remediação do acidente.

A Figura 1 situa geograficamente a área, sendo o polígono em verde representativo da área modelada geologicamente, em vermelho, a área da aquisição dos dados de geofísica e, em azul, seção geológica representada na Figura 2. Notar a localização dos poços de monitoramento, cujas descrições e análises químicas servem de banco de dados aos estudos que se seguem. Destaca-se que a indicação do grau de contaminação da área se faz por meio dos valores de TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) extraídos da zona saturada dos poços de monitoramento.

## Caracterização Geológica da Área

A área está inserida na denominada Bacia Sedimentar de Curitiba, localizada na porção centro-sul do primeiro planalto de Curitiba, ou, simplesmente, planalto de Curitiba.

Geologicamente, o terreno investigado é identificado por Salamuni & Salamuni (1999) como terraços aluvionares de origem fluvial, formados em épocas mais antigas que a de deposição dos rios atuais da região. Normalmente, são encontrados entre as planícies aluviais e as encostas, principalmente ao longo dos rios Barigüi e Iguaçu.

A unidade de sedimentos aluvionares recente é constituída, principalmente, por areias finas a grossas e cascalhos, com matriz síltico-argilosa e síltico-arenosa. O

pacote areno-rudáceo apresenta estruturas sedimentares tais como estratificações plano-paralelas e cruzadas. Os depósitos aluvionares são capeados por solos hidromórficos com espessura de cerca de 1 m. A espessura média da seqüência total pode atingir 5 m. Os citados solos hidromórficos, designação conferida a solos mal drenados ou muito mal drenados, são regidos pela influência da água em função do relevo e do material originário. Esses solos são representados pelos aluviões e terraços da bacia do Rio Iguazu e outros curso d'água principais. Caracterizam-se por apresentar cor negra, por vezes turfosos, textura argilosa, porosa e baixa permeabilidade.

A interpretação de 34 poços de monitoramento hidrológico instalados na área permitiu individualizar 4 camadas geológicas distintas, diferenciadas através de sua composição mineralógica, cor, presença de matéria orgânica, aspectos texturais, estruturais e plasticidade. A Figura 2 apresenta uma seção transversal da área estudada. Marcadamente distingue-se um sistema de argilas, revelado pelas camadas 1 a 3, e outro dominado por areias identificado como camada 4.

Destaca-se neste sistema fluvial que os principais depósitos estão associados aos de canal, aos de rompimento dos diques marginais e aos da planície de inundação. Miall (1996) atesta a grande variedade de formas geométricas e de estruturas geradas por esses depósitos. Estratificações cruzadas acanaladas, de corte e preenchimento, plano-paralelas e tangenciais, além de acamamentos cruzados acanalados e laminações cruzadas (ripple marks) devem suas formações às variadas condições de regime de fluxo do sistema. Associados aos depósitos de planície de inundação, constituídos basicamente por sedimentos mais finos, em geral siltico-argilosos, surgem estratificações ou laminações plano-paralela comumente destruídas devido à intensa atividade de organismos.

Procurou-se caracterizar as principais feições arquiteturais resultantes do sistema fluvial meandrante, uma vez que se busca caracterizar, nas seções de radar interpretadas, elementos geométricos que confirmem o modelo evidenciado.

### Modelagem Geofísica

O GPR ou georadar é um dispositivo de prospecção geofísica que se utiliza dos fenômenos de geração e propagação de ondas eletromagnéticas de altas frequências, tipicamente na faixa de 10 a 1000 MHz, e que serve para identificar estruturas pouco abaixo da superfície (Davis & Annan, 1989).

Pulsos de alta frequência são emitidos para o subsolo por meio de uma antena transmissora, sofrendo reflexões, refrações e difrações na subsuperfície, e então captados por uma antena receptora.

A aquisição dos dados de GPR, nesta pesquisa, seguiu a técnica conhecida como afastamento comum (common offset). Nesta técnica, mantém-se o afastamento entre as antenas constante durante a aquisição dos dados. O equipamento de GPR utilizado foi o RAMAC/MALÁ GeoScience com um conjunto de antenas blindadas de 250 MHz.

O levantamento 3D constituiu-se de 106 linhas de aquisição paralelas, sendo 85 linhas com comprimento de

230 m e 21 linhas com 130 m, perfazendo uma área total de 43.840 m<sup>2</sup>. O espaçamento entre traços foi de 0,3 m e entre linhas, de aproximadamente 2,0 m.

Para o processamento dos dados foi utilizado o programa RADAN para Windows NT, licenciado pela GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.). Basicamente, a rotina de processamento adotada foi: edição e normalização dos dados; aplicação de AGC (Automatic Gain Control); filtragem no domínio da frequência; deconvolução preditiva; nova filtragem no domínio da frequência; filtragem no domínio espacial (remoção de números de onda indesejáveis); restauração de ganho e edição final dos dados. Um fluxograma representativo das etapas acima descritas é apresentado na Figura 3.

Após o processamento, seguiu-se a "amarração" das informações dos poços com os refletores contínuos evidenciados nos dados de radar. Do conjunto de 34 poços de monitoramento perfurados na área, apenas 7 poços estão situados dentro do polígono de aquisição de GPR ou muito próximo. A profundidade do contato entre o sistema de argilas e areias sotopostas varia entre 1,2 a 1,5 m. Outra informação pertinente é relativa às cotas do nível de água deste sistema que variam entre 0,35 e 1,10 m, com média de 0,77 m. Estes dois contatos são os principais refletores evidenciados na área. No entanto, observa-se um terceiro, que pelas velocidades estimadas para o meio, deve representar o embasamento cristalino. Assim, estão evidenciados: em amarelo, o provável nível de água; em vermelho, o contato geológico entre argilas e areias; e, em verde, o provável topo do embasamento cristalino. A velocidade média estimada para o conjunto de corpos geológicos deste sistema foi de 0,082 m/ns, compatível com valores sugeridos para as argilas no manual do instrumento (RAMAC/GPR).

Pode-se destacar diferenciadas feições radar-estratigráficas em boa parte das linhas, pelo contato definido em vermelho e que separam argilas de areias (Figura 4). Notar na região A refletores mais contínuos, sem estruturas aparentes, e com profunda atenuação do sinal eletromagnético a partir de 25 ns. Já em B, é possível notar algumas estruturas cruzadas, destacadas em azul, características de corpos arenosos associados ao modelo deposicional estabelecido na área.

Dentre as feições evidenciadas a mais importante para a seqüência do trabalho é a do contato entre os corpos geológicos de argila e areia, identificável em quase todas as linhas do levantamento 3D. É de fundamental importância, pois diferencia duas unidades de propriedades petrofísicas bem contrastantes.

O resultado final da interpretação das seções de radar está apresentado na Figura 5, que apresenta o mapa do atributo tempo duplo de trânsito (TDT) do contato entre os corpos geológicos de argila e areia na área do levantamento 3D. Observar o mergulho do contato para o sul da área, denotando um espessamento dos sedimentos argilosos nesta posição.

### Modelagem Geoestatística

Esta etapa procura demonstrar a potencialidade de algumas técnicas da Geoestatística na construção do modelo geológico da área. A disponibilidade deste modelo é essencial no planejamento de remediação ambiental projetado para a área. Dentre os vários algoritmos

geoestatísticos disponíveis a escolha recaiu por: Krigagem Ordinária, Krigagem com Deriva Externa, Cokrigagem Colocalizada ou Collocated Cokriging e Simulação Seqüencial Gaussiana, todos largamente conhecidos na indústria petrolífera e, principalmente, fáceis de serem implementados.

Dentre os mais importantes resultados obtidos devem ser destacados: os mapas de espessuras dos sedimentos argilosos e arenosos que compõem a sistema deposicional da área (Figura 6), além dos mapas de distribuição da contaminação, medido em mg/l ou ppm (Figura 7);

A Figura 6 apresenta os mapas de estimativa das espessuras dos sedimentos argilosos (acima) e arenosos (abaixo) considerando a integração das informações de natureza geológicas (descrição dos poços de monitoramento) e as de geofísica (tempo duplo de reflexão). Os mapas posicionados à esquerda apresentam os resultados da Krigagem com Deriva Externa e os da direita Cokrigagem Colocalizada. É importante destacar que a área de levantamento GPR é menor que a área modelada geologicamente

A próxima etapa na utilização dos algoritmos geoestatísticos é estudá-los sob a ótica da simulação estocástica, que busca modelar as incertezas por meio da geração de múltiplas realizações de valores de atributos distribuídos no espaço. Quando condicionada, a simulação estocástica, produz modelos que honram os valores nos pontos amostrados, além do histograma e variograma. Após processar o resultado de 200 simulações, pode-se acessar as incertezas ou possíveis cenários de distribuição da contaminação. Três diferentes painéis são considerados na Figura 7: primeiro o que reproduz as áreas de probabilidade ser maior que o background de 1200 ppm estimado para a área. Um segundo cenário, que reflete o campo probabilístico sendo superior a 2500 ppm, e um terceiro, indicado para a remediação ambiental, que reproduz as áreas cuja probabilidade é superior a 5000 ppm nos valores de TPH.

#### Modelagem de fluxo e transporte do Alagado 4

Esta fase concentra-se na construção de um modelo hidrológico conceitual onde se procura estabelecer a geometria do sistema com suas camadas geológicas, seus contornos, suas interconexões hidráulicas e que seja capaz de representar, o mais fielmente, o ciclo da água subterrânea da área. Diversos cenários de fluxo da água subterrânea do Alagado 4 são simulados por meio do aplicativo Visual MODFLOW 3.0 (WHI), pacote de modelação matemática com solução numérica baseada nas equações de fluxo.

O modelo simulado foi obtido pela integração dos dados obtidos por meio da Krigagem com Deriva Externa (KDE), sendo considerados os valores da contaminação aqueles obtidos da Estocástica pelos valores acima de 5000 ppm de TPH.

Construída uma malha compatível com a modelagem geológica anteriormente definida, passa-se a preencher o modelo pelas propriedades fundamentais do meio poroso (porosidade, condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento específico, condições de contorno, recarga etc), permitindo assim, executar as simulações. Ajustado o campo de velocidades de fluxo do aquífero, passa-se a popular as células da malha como os dados

relativos a ao transporte da contaminação. Nesta fase, são definidas as condições de sorção do sistema, reações cinéticas, dispersão hidrodinâmica do poluente, retardo, etc. Destaca-se que grande parte dos parâmetros e propriedades definidas na etapa de modelagem de fluxo e transporte foram obtidas por meio de tabelas extraídas de Fetter, 2001. O resultado desta modelagem está apresentado na seqüência de imagens da Figura 8, que destaca a evolução da pluma de contaminação na área acidentada ao longo dos próximos 50 anos.

#### Conclusões

Danos ecológicos causados por derramamentos de óleo podem ser maiores do que revela uma primeira análise. Este trabalho busca fazer uma revisão conceitual e de aplicação de algumas ferramentas usualmente empregadas na caracterização de um acidente ambiental (GPR, algoritmos geoestatísticos e modelagem de fluxo e transporte), descrevendo a aplicação destes métodos e, fundamentalmente, integrando seus resultados.

Neste trabalho demonstra-se o aproveitamento dos dados de GPR, que embora não revelem diretamente a extensão da pluma de contaminação, foram importantes em revelar o contexto geológico da área. Ao se integrar GPR com as informações obtidas na descrição dos poços de monitoramento, por meio dos algoritmos geoestatísticos, chega-se a um modelo geológico mais fidedigno da área.

O(s) modelo(s) gerados, quando levados ao modelador de fluxo e transporte de águas subterrâneas foram capazes de predir a evolução da pluma de contaminação. Desta forma, é possível programar quais ações devem ser merecedoras de ações emergenciais seja na remoção ou contenção hidráulica da contaminação.

É importante destacar que a aquisição 3D de GPR não contemplou toda a área investigada e que, caso isso ocorresse, certamente, um modelo geológico mais consistente seria produzido pelos algoritmos geoestatísticos.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pela disponibilidade dos dados.

#### Referências Bibliográficas

- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, n.5, p. 531-551, 1989
- MIALL, A. D. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. Berlin: Springer, 1996
- SALAMUNI, E. & SALAMUNI, R. Contribuição à Geologia da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR). *Boletim Paranaense de Geociências*, número 47, p. 123-142, ed da UFPr, 1999
- XU, W.; TRAN, T; SRIVASTAVA, R. M. & JOURNEL, A. G. Integrating Seismic Data in Reservoir Modeling. *SPE Paper 24742*, Washington, USA, p. 887-902, 1992
- FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. New Jersey:Prentice Hall, 4<sup>a</sup> ed., 598 p., 2001

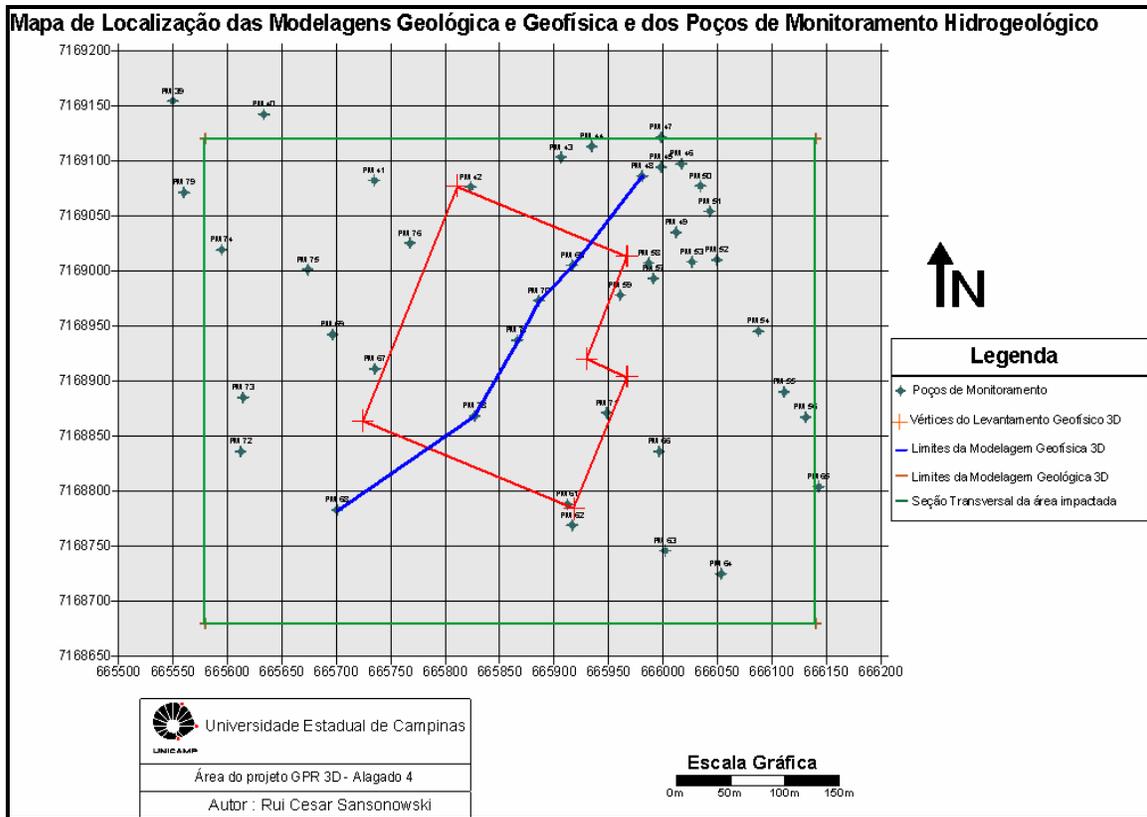


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

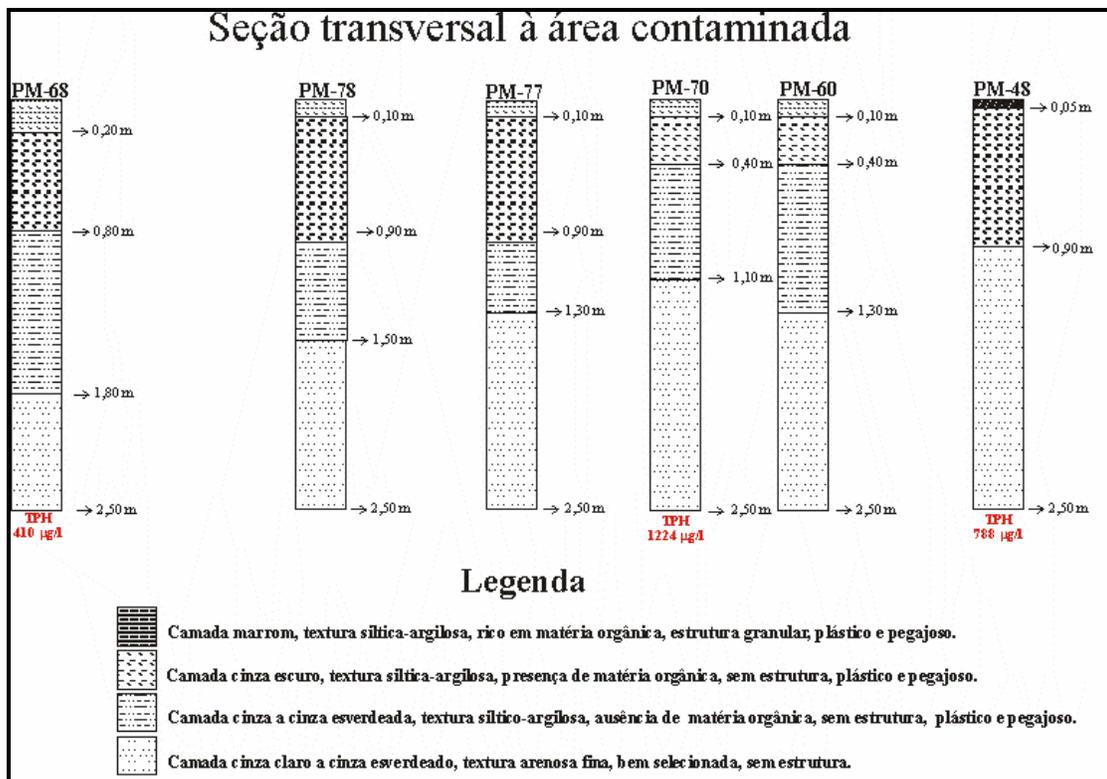


Figura 2: Seção transversal do Alagado 4 entre os poços de monitoramento 68 e 48.

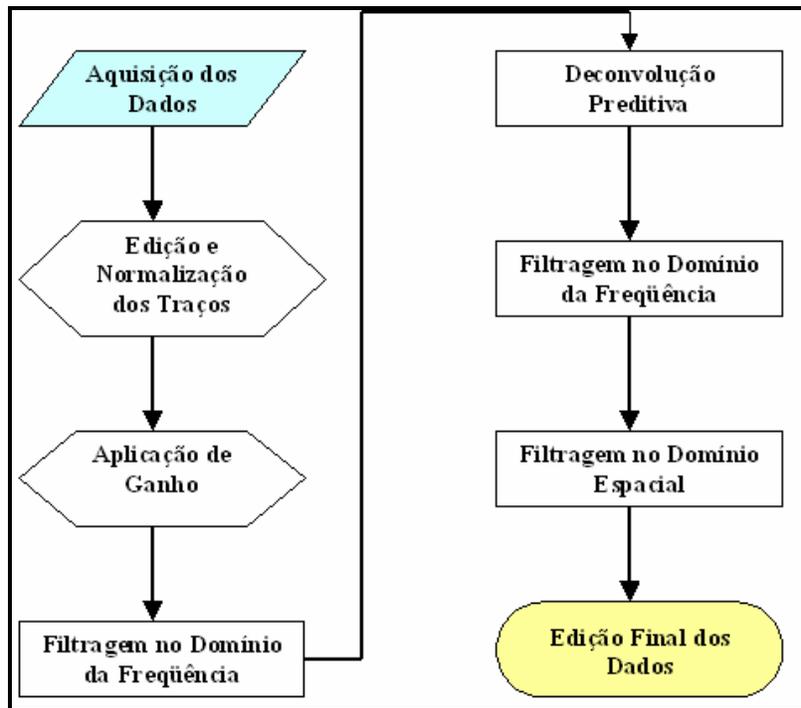


Figura 3: Fluxograma de processamento das linhas de GPR utilizado nesta pesquisa.

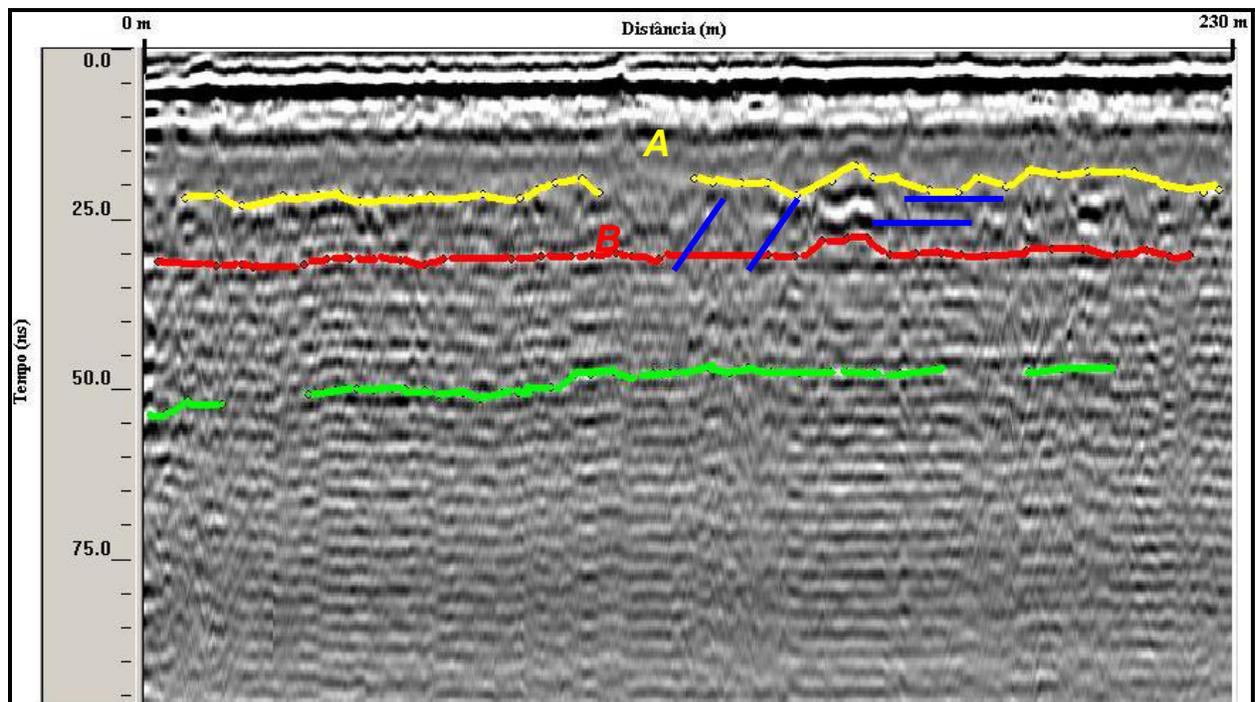


Figura 4: Feições radar estratigráficas caracterizadas em uma das linhas interpretadas.

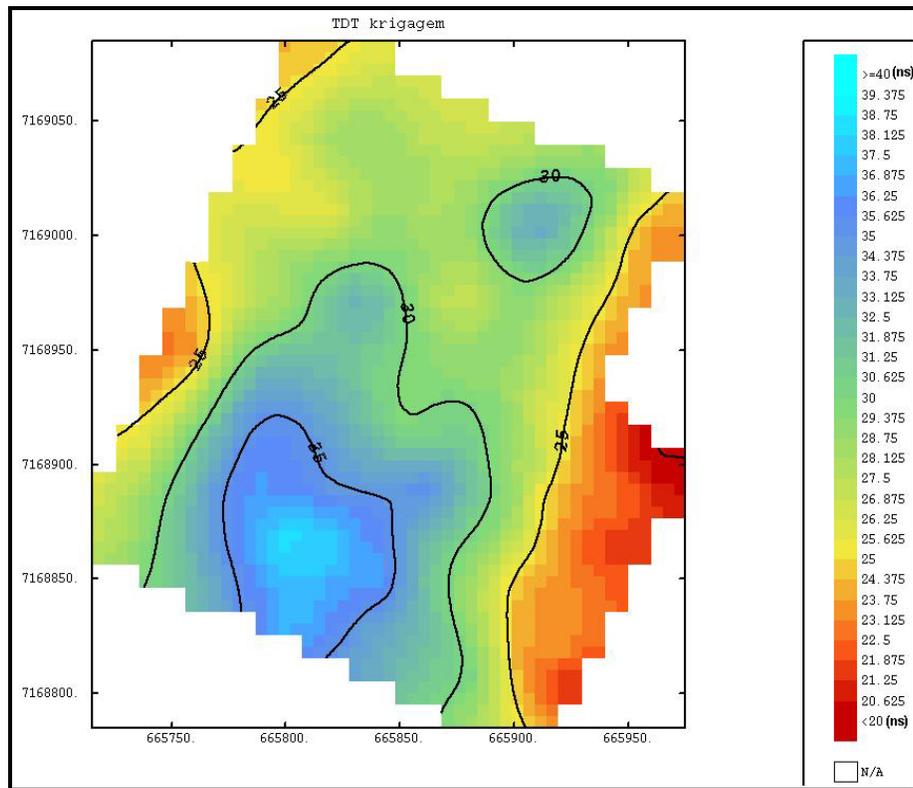


Figura 5: Mapa do tempo duplo de trânsito (TDT) do contato entre os corpos geológicos de argila e areia da área do levantamento 3D de GPR.

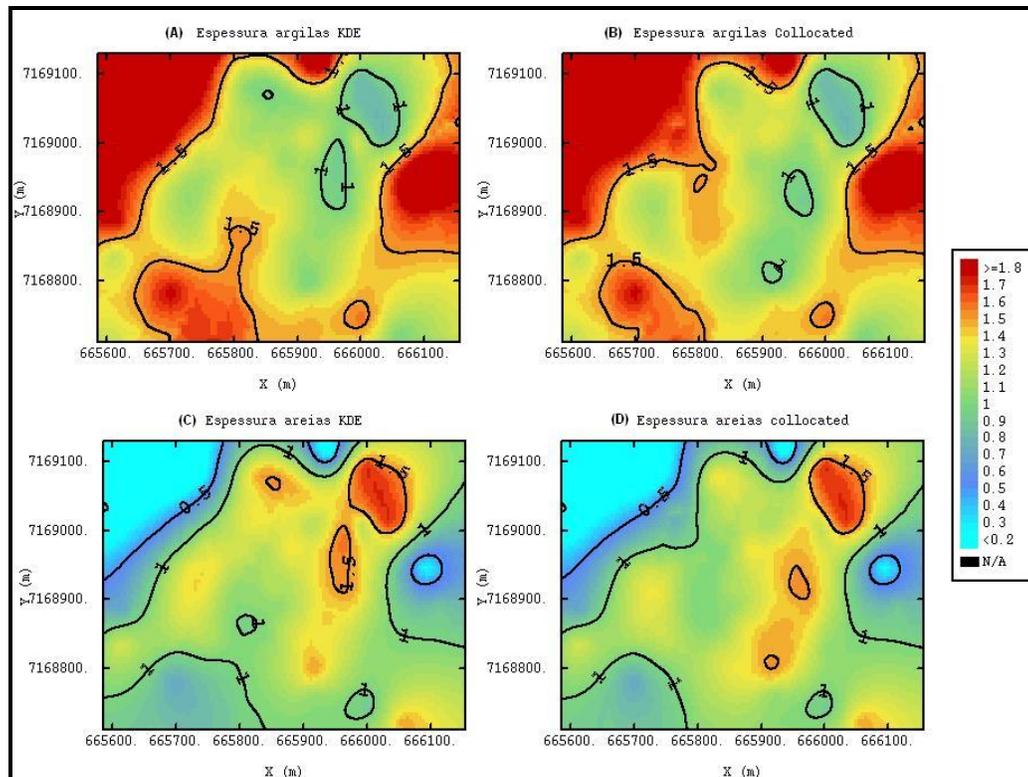


Figura 6: Mapas de espessuras estimados para argilas (acima) e areias (abaixo) utilizando os algoritmos de KDE (esquerda) e Cokrigagem Colocalizada (direita).

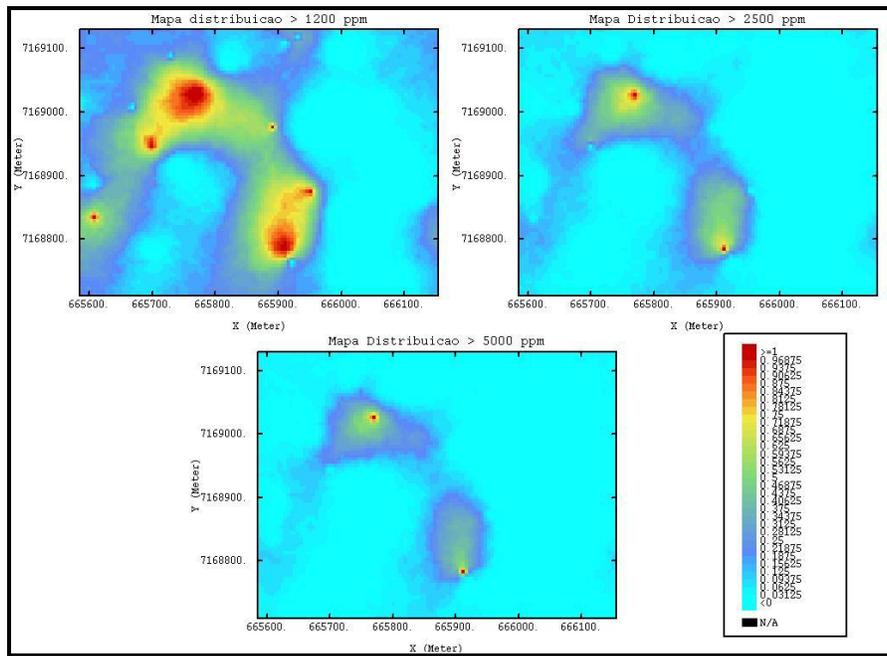


Figura 7: Diferentes cenários probabilísticos da contaminação na área do Alagado 4.

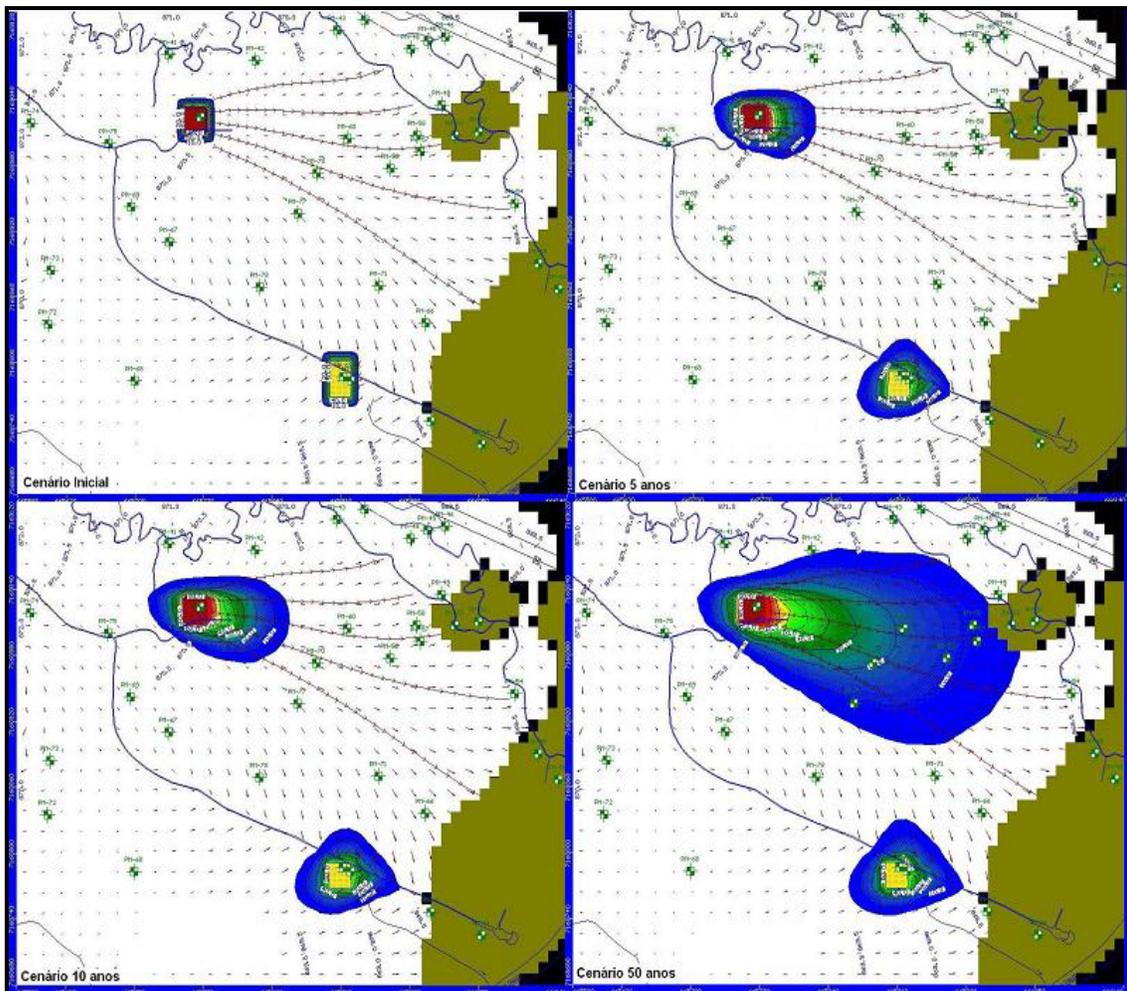


Figura 8: Evolução da pluma de contaminação (TPH) na área do Alagado 4: acima à esquerda, cenário inicial; acima à direita, cenário após 5 anos; abaixo à esquerda cenário após 10 anos; abaixo à direita, cenário após 50 anos.