

# UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL PARA DEFINIÇÃO DE CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO E DERIVADOS EM ÁREAS CONTINENTAIS

**MÁRCIA SAYURI MORINAGA**

*Ecóloga, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9430, sayurimorinaga@gmail.com*

**BRUNO BAPTISTELLA**

*Graduando em Geologia, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9430, bruno.baptistella@bol.com.br*

**CAMILA MASSARO**

*Graduanda em Geologia, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9430, ca.massaro@yahoo.com.br*

**AMANDA DE ÁVILA OLIVEIRA**

*Graduanda em Ecologia, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9430, avilavf@gmail.com*

**LUIZ HENRIQUE PEREIRA**

*Dr. Geógrafo, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9430, e\_luizh@yahoo.com.br*

**JAIRO ROBERTO JIMÉNEZ-RUEDA**

*Prof. Dr. Agrólogo, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9430, jairorjr@rc.unesp.br*

**JUÉRCIO TAVARES DE MATTOS**

*Prof. Dr. Geólogo, UNESP, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha,  
nº 333, Guaratinguetá, SP, (12)3123-2827, jttmm@hotmail.com*

**SÉRGIO DOS ANJOS FERREIRA PINTO**

*Prof. Dr. Geógrafo, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,  
(19)3526-9341, sanjos@rc.unesp.br*

**SERGIO LUIS ANTONELLO**

*Prof. Dr. Analista de sistemas, UNESP, Av 24A, nº1515,  
Rio Claro, SP, (19)3526-9430, sergio@rc.unesp.br*

## RESUMO ABSTRACT

Obras lineares tipo multidutos e estradas são instaladas em áreas com diversidade de relevos, variação litológica e processos pedogenéticos com estágios de alteração intempérica distintos. Somado a estas características, áreas de grandes extensões sofrem processos tectônicos com deformações dúcteis e rúpteis e evidenciam forte cataclase. Neste cenário, desenvolveu-se uma sistemática lógica e codificada para se obter classes de fragilidade ambiental a derramamento de petróleo e derivados para ambientes continentais. A metodologia parte da definição de critérios de análise de relevo e drenagem traduzidos pela textura de imagem de satélite obtendo-se, assim, limites entre zonas homólogas que são classificadas de acordo com suas propriedades físicas (Tropia, Permeabilidade, Plasticidade x Ruptibilidade, Alterabilidade e Assimetria). Uma equivalência entre estas permite obter as Unidades Geoambientais

Linear constructions such as multiple pipes and roads are installed in areas with a variety of reliefs, lithological variation and pedogenic processes with different stages of weathering. In addition to these features, large areas suffer tectonic processes with ductile and brittle deformation and they demonstrate strong cataclasis. In this scenario, it was developed a logic and codified systematic to obtain environmental fragility classes for oil spill and derivatives for continental environments. The methodology starts from the definition of relief and drainage analysis criteria translated by the satellite image texture obtaining, thus, boundaries between homologous zones that are classified according to their physical properties (Tropy, Permeability, Plasticity x Rupture, Alterability and Asymmetry). An equivalence between these allows to obtain the Geoenvironmental Units

que representam espacialmente diferenças do meio físico. A análise de imagem de satélite também possibilita obter informações da tectônica dúctil da área, caracterizada por altos e baixos estruturais, e da tectônica rúptil, evidenciada por feições de fraturamento (juntas e falhamentos) das quais derivam em zonas de variação de máximos 1 e 2. As informações citadas foram mapeadas e cartografadas em documentos distintos e integradas em um mapa síntese de classes de fragilidade ambiental a derramamentos de petróleo em uma área de duto preestabelecida.

**Palavras chave:** sensoriamento remoto; mapeamentos geoambientais; fragilidade ambiental

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas, desde os primórdios até o atual estágio de desenvolvimento, são direta ou indiretamente responsáveis pela maioria das tragédias ambientais observadas. A simples ocupação rural, urbana e industrial, práticas agropastoris e construções de grandes obras civis, dentre outras intervenções, alteram o equilíbrio dinâmico dos ambientes naturais.

Pode-se dizer que a fragilidade ambiental é o condicionamento do meio físico às inserções humanas, em função das características genéticas de cada localidade. O conhecimento dos aspectos físicos possibilita a compreensão da dinâmica de funcionamento do ambiente natural, tão importante para o planejamento territorial tanto para a prevenção de acidentes quanto ao aproveitamento das potencialidades (ROSS, 1994).

Explorações de recursos naturais também têm registrado casos de acidentes de grande impacto ambiental. Em especial os derramamentos de petróleo causam sérios problemas ambientais, sociais e econômicos, o que levou o governo a adotar medidas mais rígidas de segurança operacional nas plataformas marítimas. Houve também a criação de um método de levantamento de dados ambientais com a finalidade de tornar mais eficiente o planejamento das ações de contingência em caso de acidente e para o conhecimento das consequências aos ecossistemas, conhecido como Carta SAO (GUILHERME et al., 2009).

which represent spatially differences in the physical environment. The analysis of the satellite image also enables to obtain information from the ductile tectonic of the area, characterized by structural highs and lows, and from the brittle tectonic, evidenced by fracturing features (joints and faults) from which can be derived in maximums of 1 and 2 variation zones. All those information mentioned were mapped and charted in different documents which were integrated in a synthesis map presenting geoenvironmental fragility classes to oil spills in a predetermined pipe area.

Em áreas continentais também são registradas várias formas de derramamentos de petróleo e seus produtos derivados. Assim, o conhecimento do meio físico, como a geologia e suas relações com o relevo e manto de alteração intempérica, e da fragilidade a estes eventos tornam-se úteis para um melhor planejamento de ocupação e tomada de decisões em casos de acidente.

Para Ross (1994), a fragilidade é dada principalmente pela dinâmica em superfície, considerando características como a declividade ou índice de dissecação, solo, uso da terra e cobertura vegetal. Para Crepani et al. (1996) a análise envolve a geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima. No entanto, sabe-se que muitos problemas ambientais de origem antrópica possuem forte relação com o sistema em subsuperfície, como no caso de derramamentos de petróleo e derivados em que há grande importância da dinâmica de permeabilidade e percolabilidade do material, levando a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Dessa maneira, há uma necessidade de se desenvolver uma metodologia para o mapeamento e representação cartográfica da fragilidade do meio físico em áreas continentais. Este artigo tem como objetivo desenvolver uma sistemática de trabalho, a partir da interpretação de produtos de sensoriamento remoto, para o reconhecimento de diversos aspectos do meio físico sob o enfoque para o derramamento de petróleo e seus derivados.

A área piloto para realização do estudo foi um segmento do Oleoduto Curitiba-Paranaguá (OLAPA), devido à importância deste para o

abastecimento de hidrocarbonetos na região metropolitana de Curitiba, e pela ocorrência de acidentes (vazamentos) de médio e pequeno porte que causaram impactos ambientais negativos, prejuízos sócio-econômicos para a população e, consequentemente, para o Estado.

## 2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA

A área escolhida para o desenvolvimento da metodologia situa-se na porção leste do Estado do Paraná entre os Meridianos 48°56'51"W e 49°12'48"W e Paralelos 25°28'46"S e 25°42'47"S

(Figura 1). Compreende porções de cinco municípios: São José dos Pinhais, Curitiba, Piraquara e Morretes.

Em relação à geologia são encontrados próximo à cidade de São José dos Pinhais (a noroeste da área de estudo), sedimentos colúvio-aluviais quaternários, denominados Formação Guabirotuba. Na porção leste da área predominam riolitos e andesitos aflorantes da Formação Guaratubinha. Afloram também corpos intrusivos de granitos subcalinos e alcalinos e migmatitos e granitos de anatexia que sustentam os espigões locais e cristas da Serra do Mar.

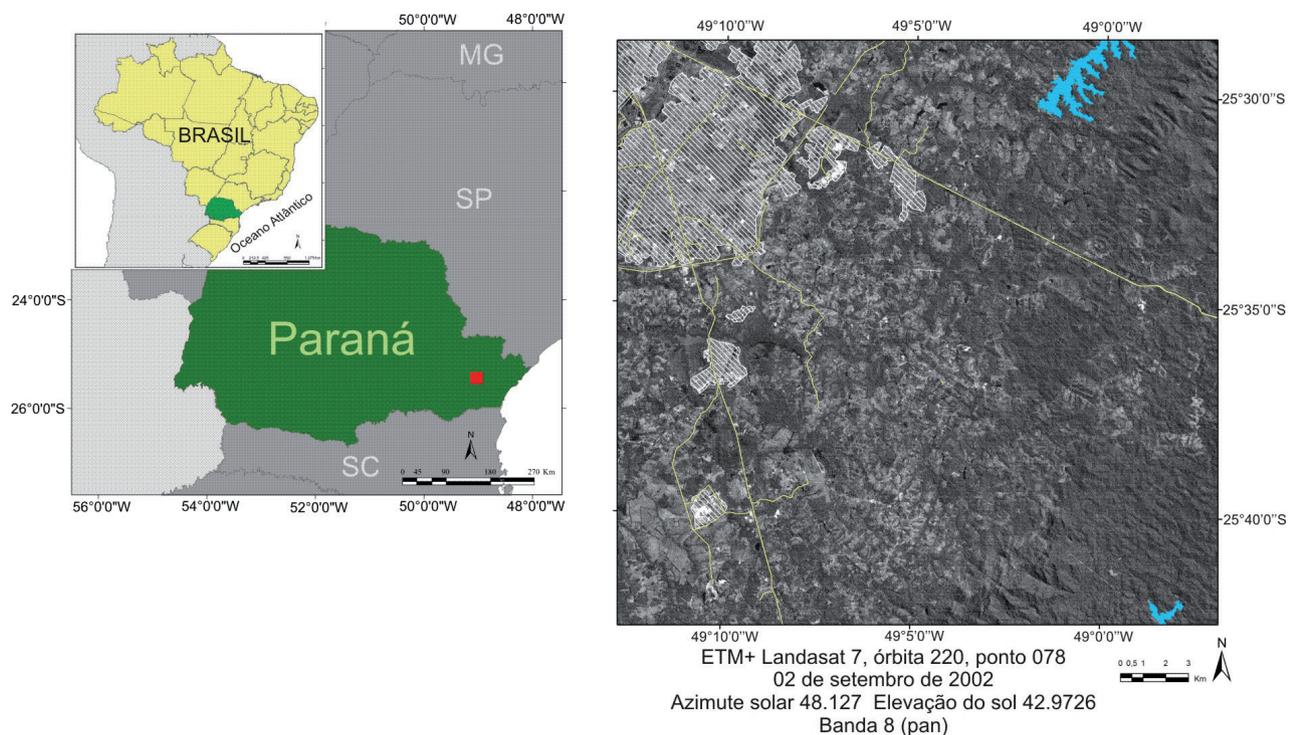


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Quanto ao clima da região, segundo a classificação de Köppen, seguindo o sentido oeste-leste, ocorre predomínio do tipo Cfb e associações dos tipos Cfa/Cfb e Cfb/Cfa. Por Cfb, entende-se clima temperado com verão fresco, apresentando temperatura média do mês mais frio entre 18 e -3°C e, no mês mais quente abaixo de 22°C, sem estação seca definida, com chuva em todos os meses sendo a precipitação média do mês mais seco superior a 60 mm. Já a classe Cfa difere da Cfb na temperatura média do mês mais quente que é superior a 22°C (IAPAR, 2009).

A área está inserida em duas Bacias Hidrográficas: Bacia do Rio Iguaçu e Bacia Litorânea. Os principais canais fluviais são os rios Iguaçu, Barigui, do Maurício, do Despique e Passauna. Nas porções mais elevadas do relevo, a rede de drenagem apresenta predomínio dos padrões dendrítico e sub-dendrítico. Muitos canais fluviais apresentam-se alterados pela ação antrópica (retificação, represamentos, entre outros).

A área estudada, em sua maioria, encontra-se na unidade geomorfológica do Primeiro Planalto Paranaense, que está dividida nas subunidades do

Planalto de Curitiba, Planalto do Alto Iguaçu, Blocos Soerguidos e Planícies Fluviais (OKA-FIORI e SANTOS, 2006). Ocorre também na área, a unidade da Serra do Mar que apresenta como única subunidade morfoescultural, os Blocos Soerguidos da Serra do Mar, com modelado de topos alongados em cristas.

Solos do tipo Latossolos Vermelho e Argissolos Vermelho-Amarelo são predominantes nas unidades geomorfológicas dos planaltos. Contudo, nessas unidades também ocorrem Cambissolos Háplicos e Latossolos Brunos. Nas áreas dominadas por planícies aluviais predominam os solos do tipo Gleissolos Melânicos e, subordinadamente, Organossolos Mésicos. Afloramentos de rocha ocorrem nas áreas dos Blocos Soerguidos (EMBRAPA, 1981).

### 3 MAPEAMENTO GEOAMBIENTAL

O mapeamento geoambiental envolve uma série de procedimentos fotointerpretativos com a finalidade de compartimentar uma determinada região em áreas que apresentam internamente propriedades distintas das áreas adjacentes.

Tais informações fornecem subsídio para diversos objetivos de pesquisas geoambientais (MATTOS et al., 2002a). Segundo Soares e Fiori (1976), a fotointerpretação com base nas propriedades do meio físico pode ser aplicada em mapeamentos geológicos, no planejamento de obras de engenharia, na localização de áreas de captação de recursos hídricos, além de processos geomorfológicos, como movimentos de massa, assoreamento de vales, erosão acelerada e áreas sujeitas a inundações periódicas.

Neste trabalho foi utilizada a imagem ETM+ Landsat 7, banda 8 (pancromático), órbita 220, ponto 078, de 02 de setembro de 2002; azimuth solar de 48,127; elevação do sol de 42,9726, com a resolução espacial de 15 metros, em escala de 1:50.000, com contraste linear. A escolha desta banda deve-se a sua resolução espacial. Tanto a banda quanto a escala de trabalho escolhidas permitiram uma observação e identificação mais eficiente dos elementos de análise.

#### 3.1 Interpretação das imagens de satélite

A interpretação das imagens de satélite para caracterização do meio físico é baseada na análise

dos elementos de relevo e de drenagem, das formas resultantes e de suas propriedades. Estes elementos são analisados por suas características espectrais e radiométricas, refletidas pelo arranjo dos elementos tonais na forma de diferentes texturas.

O princípio metodológico de fotointerpretação usado nesta etapa do trabalho foi proposto por Guy (1966), adaptado por Soares e Fiori (1976) e sistematizado por Veneziani e Anjos (1982). A sistemática lógica envolve três etapas: a fotoleitura, em que são reconhecidos e identificados os elementos presentes na imagem com os objetos e repartição; a fotoanálise, em que se reconhecem as leis e a complexidade de organização dos elementos para a caracterização das formas de interesse; e fotointerpretação, que é o estabelecimento das relações entre a função e o objeto e/ou suas feições, ou seja, é o estabelecimento de uma correlação entre a imagem produzida pelo sensor e o modelo do fenômeno natural, dando um significado geoambiental.

Assim, a sequência lógica de extração de dados por meio de um método sistemático permite analisar na imagem, as características de textura, estrutura e forma do elemento do terreno, e atribuir um significado de acordo com o objetivo das análises.

#### 3.2 Zonas homólogas

Na fase de fotoanálise, o relevo e a drenagem são os objetos que dão a partida para todo o mapeamento, pois suas feições definem os elementos texturais, a partir dos quais se processam todas as análises posteriores.

O elemento textural é o elemento primário de análise na fotointerpretação e foi definido por Guy (1966) como “o menor elemento identificável na imagem, contínuo, homogêneo e passível de repetição”. Esta última característica gera uma densidade textural de imagem e, ao identificar suas variações, é possível estabelecer uma ordenação dos elementos de textura para definir as estruturas, que podem ser em função da intensidade de organização (grau de estruturação) e da complexidade de organização (ordem de estruturação) como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1** – Caracterização das propriedades texturais de imagens orbitais

Propriedade Textural	Caracterização
Elemento Textural	Tipos dos elementos texturais para serem analisados (topografia, drenagem, forma).
Densidade Textural	Quantidade de elementos texturais por unidade de área da imagem (qualitativa).
Distribuição Textural	Disposição dos elementos texturais no espaço, de acordo com um arranjo padrão (retangular, circular).
Grau de Estruturação	Evidência de organização espacial dos elementos texturais de acordo com sua disposição.
Organização da Estruturação	Complexa organização dos elementos texturais. É dada em termos de estruturas sobrepostas.

Na área de estudo, foram definidas as classes de densidade textural (DT), a partir dos seguintes critérios:

- Muito alta (maDT): Repetição muito frequente dos elementos texturais, sendo muito pequenas suas superfícies;
- Alta (aDT): Repetição dos elementos texturais, sendo a sua superfície pequena;
- Moderada (moDT): Moderada repetição dos elementos texturais, sendo a sua superfície média.
- Baixa (bDT): Baixa repetição dos elementos texturais, sendo a sua superfície grande.

As diferentes densidades texturais e a sua lei de organização permitiram traçar limites que distinguem tais variações. Esta compartimentação define os padrões de relevo e drenagem a serem analisados para a interpretação de suas propriedades.

Assim, iniciou-se a fase de fotointerpretação onde cada território subdividido foi classificado de acordo com as propriedades do meio físico: Tropia, Permeabilidade, Plasticidade x Ruptibilidade, Alterabilidade e Assimetria. As propriedades foram interpretadas de acordo com os dois grandes compartimentos fisiográficos: aquelas com características correspondentes ao Primeiro Planalto Paranaense, com a presença de material sedimentar e vertentes festonadas; e aquelas correspondentes a Serra do Mar, com a presença de material tipicamente cristalino, vertentes retilíneas e cristas alongadas. Esta diferenciação foi necessária, pois tais características alteram alguns critérios interpretativos.

A interpretação das propriedades do meio físico ocorreu por correlação com a textura das imagens, segundo proposta de Mattos et al. (2002a), descritos a seguir:

Tropia (O) – corresponde à orientação ou não das formas de relevo e drenagem. Materiais ígneos são isotrópicos por natureza, não apresentando, assim, orientação das formas de relevo e drenagem. Os materiais metamórficos são anisotrópicos, devido a sua foliação, gnaissificação ou xistosidade e apresentam relevo e drenagens alinhados. A anisotropia das formas pode também ser resultado de intenso fraturamento. Esta propriedade permite compreender a forma e distribuição dos elementos texturais analisados, possibilitando fazer algumas inferências quanto à litologia e estruturas deformacionais presentes em uma determinada área. As classes e os critérios adotados para determinação da tropia foram:

- Muito Orientada (mO): Relevo e drenagem unidirecionais, com cristas alongadas e contínuas;
- Orientada (O): Drenagem unidirecional e relevos variando em uma ou duas direções. Podem ocorrer cristas interrompidas por fraturas em uma segunda direção preferencial;
- Pouco Orientada (pO): Drenagem bidirecional, relevo sem cristas e morros alinhados em uma ou duas direções;
- Não Orientada (nO): Relevo e/ou drenagem alinhados em mais de duas direções

Permeabilidade (P) – relaciona-se com a capacidade de infiltração das águas das chuvas no terreno. Em materiais sedimentares, esta propriedade deve-se principalmente à porosidade primária (intergranular). Já em materiais metamorfizados ou ígneos, à porosidade secundária (fraturas). Segundo Rivereau (1970), em produtos de sensoriamento remoto, a informação sobre a permeabilidade das rochas é obtida a partir da densidade da rede de drenagem e do grau de dissecação do

relevo. Ambos são inversamente proporcionais à permeabilidade quando em terrenos sedimentares e diretamente proporcionais em terrenos de rochas cristalinas. Esta propriedade é de relevante interesse para estudos geoambientais, já que indica o risco de problemas como inundação e erosão fluvial, além da possibilidade de inferir sobre a dinâmica de fluxo de água em subsuperfície e do grau de intemperismo. As classes estabelecidas para esta propriedade e seus critérios interpretativos foram:

- Muito Permeável (mP): Ausência de feições de drenagem;
- Permeável (P): Poucas feições de drenagem;
- Pouco Permeável (pP): Presença moderada de feições de drenagem;
- Não Permeável (nP): Forte presença de feições de drenagem ou áreas com canais abandonados e/ou alagáveis

Plasticidade X Ruptibilidade (F) - os materiais, ao sofrerem um esforço compressivo, deformam-se de forma rúptil ou dúctil. Os materiais rúpteis aliviam tais forças ao desenvolver fraturas (falhas e/ou juntas). Já os materiais dúcteis, por meio do desenvolvimento de dobramentos isoclinais geram foliações e reorganização dos minerais ou simplesmente dobras flexurais sem foliação aparente. As rochas com diferentes ruptibilidades se comportam de maneiras distintas quando submetidas a esforços de tração e compressão, que refletirá em maior ou menor grau de fraturamento. Isto permite indicar áreas com maior percolabilidade e possibilita inferir o grau de intemperismo e o comando do maior ou menor circulação de fluidos em subsuperfície. As classes estabelecidas e seus critérios foram:

- Muito Fraturado (mF): Mais de 60% da área com traços de juntas, ausência de foliações e material altamente rúptil;
- Fraturado (F): De 30 a 60% da área com traços de juntas, pouca presença de foliações e material rúptil;
- Pouco Fraturado (pF): Menos de 30% da área com traços de juntas ou com grande presença de foliações e comportamento entre rúptil e dúctil;
- Não Fraturado (nF): Ausência de traços de juntas ou excesso de foliações, material com comportamento dúctil

Alterabilidade (R) - é o potencial de alteração química e física do maciço quando se encontra sob a ação de agentes intempéricos. A classificação da Alterabilidade correlaciona-se à erosão, ou seja, áreas em que predomina a Alterabilidade alta possuem uma baixa resistência à erosão, formando um espesso manto de alteração intempérica. De forma contrária, áreas onde a Alterabilidade é baixa, predomina uma alta resistência à erosão e quase não existe material inconsolidado de cobertura, com exceção dos solos rasos (litossolos). Além de fornecer informações sobre a estabilidade dos terrenos quanto a colapsos e erosões esta propriedade indica o potencial a permeabilidade de fluidos de acordo com a espessura do manto de alteração intempérica. As classes estabelecidas e os critérios foram:

- Muito Resistente (mR): Cristas alongadas, interrompidas ou não, com vertentes côncavas e simétricas;
- Resistente (R): Encostas com vertentes côncavo-retilíneas e topos levemente convexos;
- Pouco Resistente (pR): Encostas com topos convexos e parte inferior côncava;
- Não Resistente (nR): Sucessão de formas convexas rebaixadas

Assimetria (A) - considera-se um relevo assimétrico quando as quebras negativas e positivas separam duas zonas, uma com maior e outra com menor declividade, ou com propriedades de relevo diferentes alternadamente. A assimetria de drenagem é determinada pela diferença de densidade, extensão e angularidade entre os dois lados de um alinhamento negativo e que para ele convirjam. Esta propriedade permite uma avaliação rápida da estrutura geológica, podendo definir classes de mergulho de camadas. Pelo exame da imagem, pode-se definir diferentes graus de assimetria e simetria, classificados de acordo com os seguintes critérios:

- Muito Alta Assimetria (maA): Mergulho menor que 3°, camadas subhorizontais e rede de drenagem apresentando forma bidirecional com angularidade média, elementos curvos e retilíneos;
- Alta Assimetria (aA): Mergulho de 3 a 10°, camadas pouco inclinadas e rede de drenagem unidirecional, com angularidade baixa, ou bidirecional assimétrica;

- Moderada Assimetria (moA): Mergulho de 10 a 30°, camadas medianamente inclinadas e drenagem assimétrica;
- Baixa Assimetria (bA): Mergulho de 30 a 60°, camadas fortemente inclinadas a subverticais e rede de drenagem unidirecional, com angularidade média e a direção dominante desenvolve-se paralelamente à direção das camadas.

O conjunto de compartimentos e suas propriedades interpretadas definem o mapa de zonas homólogas por textura de imagem. Nota-se que não foram definidas as zonas homólogas em áreas urbanas devido à dificuldade de interpretação dos elementos texturais ocasionada pela alteração do relevo e drenagem.

Uma etapa de campo permitiu a constatação das propriedades interpretadas, assim como das

feições de relevo e espessuras de manto de alteração intempérica.

### 3.3 Unidades Geoambientais

As Unidades Geoambientais foram elaboradas a partir das zonas homólogas, onde se realiza a equivalência entre as mesmas, utilizando relações de ordem (zonas homólogas com mesmas propriedades que recebem a mesma denominação) ou simetria (zonas homólogas adjacentes com as mesmas propriedades que tornam-se somente uma unidade geoambiental por aglutinação), constituindo, assim, Unidades Geoambientais. A partir de sua cartografia, é possível estabelecer classes de potencialidade e limitações do meio físico, para diferentes usos, por meio das propriedades observadas. O mapa de Unidades Geoambientais é apresentado na Figura 2, a seguir.

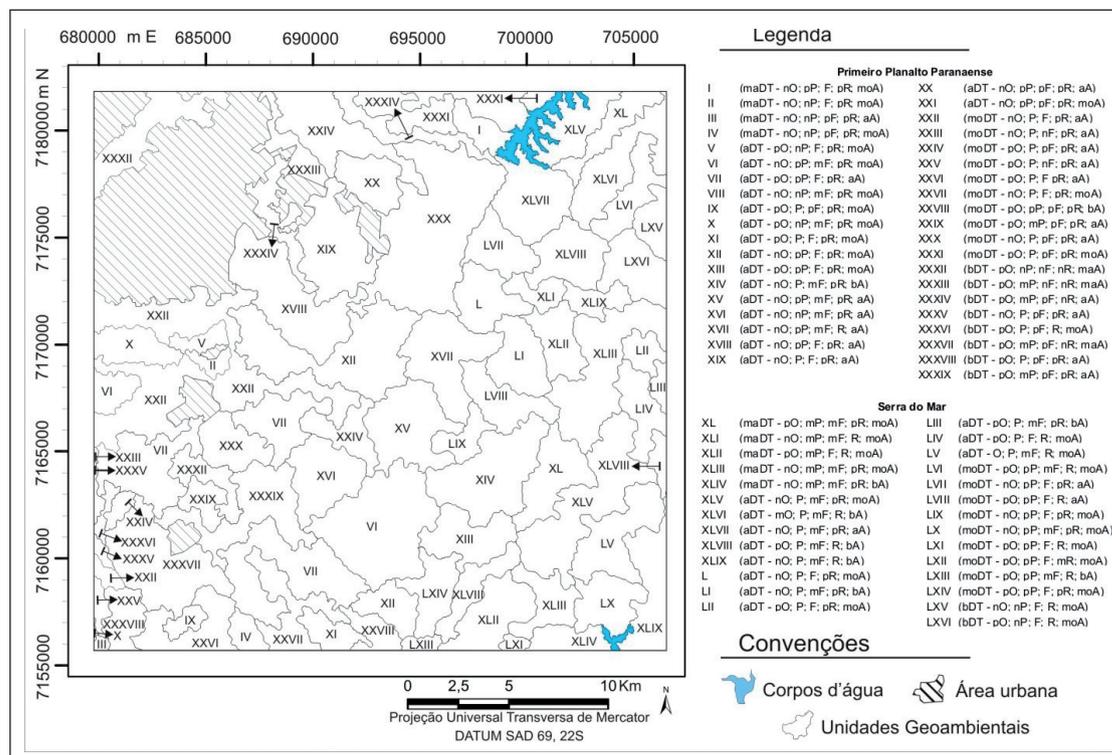


Figura 2 - Mapa de Unidades Geoambientais da região de São José dos Pinhais (PR).

## 4 MAPEAMENTO MORFOESTRUTURAL

A sistemática da análise morfoestrutural parte do pressuposto de que muitas estruturas geológicas podem ser refletidas em superfície e que tal reflexo é passível de identificação por meio da análise de padrões específicos como anomalias da

rede de drenagem e de feições de relevo. Os materiais utilizados são produtos de sensoriamento e/ou cartográficos que auxiliam no reconhecimento e delimitação dessas anomalias e feições.

Esse método utiliza-se dos elementos de drenagem e de relevo, sua associação e classificação de acordo com o caráter homólogo ou não dos

mesmos. Este mapeamento procura ainda interpretar o significado geológico para as diferentes formas ou associações dos elementos de drenagem e relevo, admitindo que estes sejam condicionados por fatores estruturais ou litológicos, através dos processos morfogenéticos atuando sobre o substrato (SOARES et al., 1982; MATTOS et al., 2002b).

#### 4.1 Extração da Rede de Drenagem

A extração da rede de drenagem foi realizada sobre cartas topográficas nas escalas 1:50.000 e 1:25.000 e da mesma imagem do satélite Landsat utilizada no Mapeamento Geoambiental, nas bandas 8 e 4. A banda 8 (pancromática) permitiu uma melhor definição das formas e padrões de drenagem, devido a sua resolução espacial. Já a banda 4 (infra-vermelho próximo) é um material auxiliar, pois emite melhor resposta espectral para relevo e corpos d'água no entanto compromete na resolução espacial.

O traçado da rede de drenagem foi obtido a partir da extração dos canais representados nas cartas topográficas, complementados por meio da disposição da curvas de nível e revisados com as imagens de satélite, procurando-se representar com precisão a sua geometria.

#### 4.2 Análise da Rede de Drenagem

A análise da rede de drenagem tem como objetivo a busca por evidências que possibilitem a interpretação estrutural e/ou litológica. O controle estrutural é definido pela presença das descontinuidades, tanto devido ao acamamento ou foliação como às fraturas. O seu arranjo espacial controla a disposição dos elementos de drenagem.

Para a compreensão do arcabouço estrutural e tipos de controle foram utilizadas as seguintes análises:

- Análise e delimitação de Trends estruturais (ou zonas homólogas de drenagem unidirecional fortemente estruturado). São definidos a partir da análise da rede de drenagem, onde os elementos de 1ª e 2ª ordem de drenagem encontravam-se alinhados anormalmente segundo duas direções preferenciais. Esses feixes (Trends) são interpretados como sendo

o reflexo em superfície de falhas de grande rejeito (centenas de metros) no embasamento (SOARES et al., 1982).

- Análise das formas anômalas de drenagem (anelares, radiais, assimetrias e lineamentos estruturais). As formas anelares representam o reflexo na superfície de camadas flexuradas, geralmente se estabelecendo sobre estruturas dômicas ou depressões estruturais, concordantes com o acamamento ou com o fraturamento anelar. As drenagens radiais também podem ser o reflexo do controle estrutural e indicam o sentido geral do mergulho das camadas, mas podem ser de expressão puramente topográfica. Assim, para constatar os altos e baixos estruturais com maior precisão, recomenda-se que essas formas sempre sejam analisadas em conjunto com as formas de assimetria de drenagem, que fornecem indicações de mergulho convergentes ou divergentes do acamamento. Por fim, os lineamentos estruturais são interpretados como descontinuidades da crosta que podem representar discordâncias estratigráficas e/ou estruturais e geralmente representam os grandes falhamentos da área.
- Determinação dos altos e baixos estruturais por meio das linhas de contorno estrutural não-cotadas. Resultam da interpretação das feições anômalas da drenagem, dos padrões assimétricos da rede de drenagem e de Trends e lineamentos estruturais. As linhas de forma correspondem à disposição geométrica do acamamento/foliação, assumindo um significado aproximado de contorno estrutural não-cotado.
- Análise e cartografia dos traços de juntas, seus máximos 1 e 2 e delimitação das zonas de variação de máximos 1 e 2. A partir da extração de elementos de drenagem de 1ª e 2ª ordem retilíneos e fortemente estruturados são obtidos traços de juntas. As duas direções preferenciais ocorridas em uma área são denominadas de máximo 1 e máximo 2 de traços de juntas. As zonas de variação de máximos 1 e 2 são obtidas pela identificação das áreas com intersecção entre duas ou mais direções dos máximos.

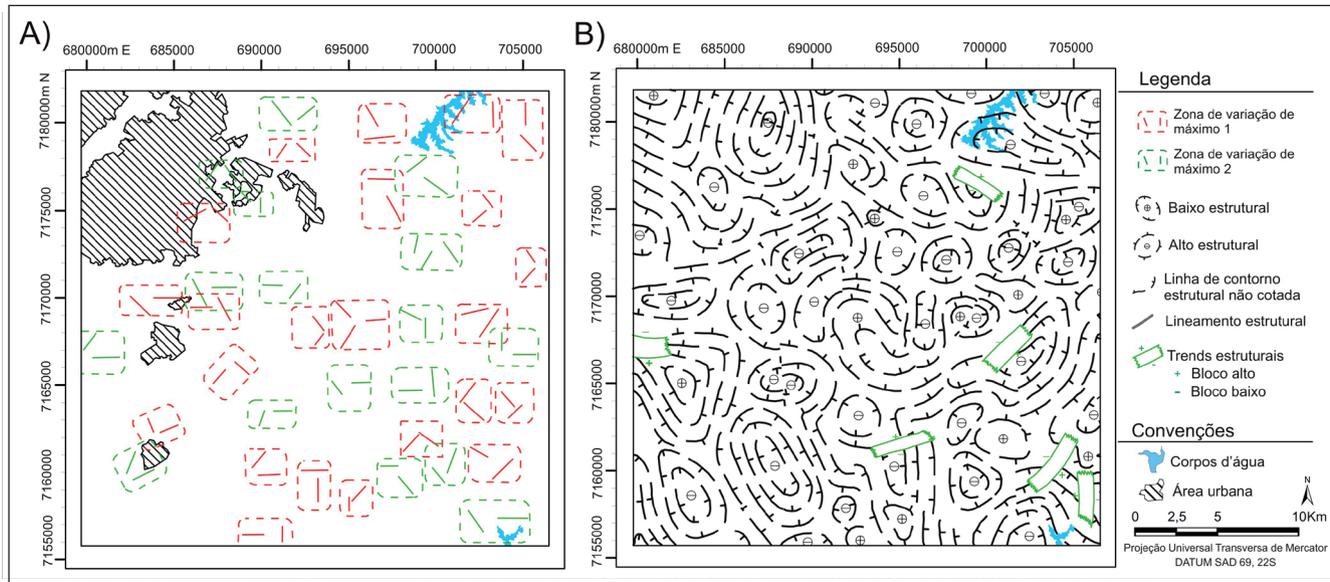
Algumas destas análises ficam comprometidas na área urbana devido a modificações realizadas na drenagem, como canalização, retificação

e represamento. A determinação de linhas de contorno estrutural não-cotadas foi possível por se tratar de linhas de tendência.

Uma análise de campo foi realizada, o que permitiu a constatação da presença de feições

mapeadas, além de tomada de medidas estruturais das descontinuidades.

Após análise e mapeamento de todas as feições descritas anteriormente, obtiveram-se como resultados os mapas apresentados na Figura 3, a seguir:



**Figura 3** - Resultados do Mapeamento Morfoestrutural. Em A), o mapa de zonas de variação de máximos e em B) o mapa de altos e baixos estruturais da região de São José dos Pinhais (PR).

Segundo Mattos et al. (2002b), áreas de ocorrência somente de zona de variação de máximo 1 apresentam alta erodibilidade. Já nas de zona de variação de máximo 2, os processos de erodibilidade estão apenas potencializados e não instalados, pois as formas de relevo estão em equilíbrio dinâmico quando não passam por modificações antrópicas, se desestabilizando ao início de qualquer intervenção humana. Quando se sobrepõem zonas de variação de máximos 1 e 2, tais áreas possuem processos erosivos já instalados, caracterizando-as como de muito alta erodibilidade. Na área de estudo, pode-se observar a maior frequência de zonas de variação de máximos na porção leste, o que demanda mais atenção com relação à instabilidade do terreno.

O mapa de linhas de forma ou de contorno estrutural não-cotado demonstra que na área os altos e baixos estruturais apresentam-se muito perturbados por descontinuidades e Trends, modificando suas configurações e, em alguns casos, colocando em contato camadas com o sentido do mergulho inverso. Tais feições reforçam a hipótese da área ter passado por diferentes

processos deformacionais pós-ciclo brasileiro. Essas diferentes retomadas dos processos deformacionais atuam, em geral, sobre antigas zonas de fraqueza (descontinuidades), reativando-as. A presença das descontinuidades e Trends é mais marcante na porção leste da área de estudo, local este de domínio de relevo característico do compartimento fisiográfico Serra do Mar.

## 5 MAPA DE FRAGILIDADE DO MEIO FÍSICO A DERRAMAMENTO DE ÓLEO E DERIVADOS

Com os materiais obtidos dos mapeamentos descritos anteriormente, desenvolveu-se um mapa de fragilidade do meio físico ao derramamento de petróleo e derivados para a região estudada. O mapa de fragilidade do meio físico é um mapa síntese gerado da integração dos diferentes documentos obtidos no mapeamento geoambiental e morfoestrutural.

A maior problemática de derramamento de petróleo e seus derivados em ambientes continentais

é o seu aprisionamento subsuperficial, já que contaminam o solo, a água subterrânea, e são de difícil remoção. Assim, o conhecimento das localidades com características mais agravantes, auxilia no planejamento da ocupação e gestão de território, além de controlar e prevenir vazamentos.

Por meio do mapeamento geoambiental foram estabelecidas classes de fragilidade, de acordo com o seu potencial percolativo, estabelecendo-se valores para as classes das propriedades mais relevantes (Alterabilidade, Permeabilidade e Plasticidade X Ruptibilidade), como podem ser observadas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Valores estabelecidos para cada classe das propriedades: Alterabilidade (Resistência à Erosão), Permeabilidade e Plasticidade x Ruptibilidade para a determinação das Classes de Fragilidade.

Alterabilidade		Permeabilidade		Plasticidade X Ruptibilidade	
Classe	valor	Classe	valor	Classe	valor
Muito resistente (mR)	3	Muito permeável (mP)	8	Muito fraturado (mF)	4
Resistente (R)	6	Permeável (P)	6	Fraturado (F)	3
Pouco resistente (pR)	9	Pouco permeável (pP)	4	Pouco fraturado (pF)	2
Não resistente (nR)	12	Não permeável (nP)	2	Não fraturado (nF)	1

A Alterabilidade é a propriedade que recebeu maior importância, pois por meio de sua interpretação pode-se apontar localidades onde o manto de alteração intempérica é mais espesso (não resistente - nR), e portanto, são estes os locais com a maior quantidade material inconsolidado que pode ficar saturado pelos fluidos derramados em acidentes. Ao contrário, em locais muito resistentes, onde podem ocorrer solos rasos, a pouca profundidade em que se encontra o maciço rochoso diminui a quantidade de material inconsolidado contaminado.

A Permeabilidade, muito importante para a análise desta temática ambiental, indica de forma direta as localidades com maior facilidade de entrada de fluidos no sistema subsuperficial. Foi considerada uma propriedade de importância intermediária quanto aos critérios de fragilidade, pois é dependente da espessura do manto de alteração.

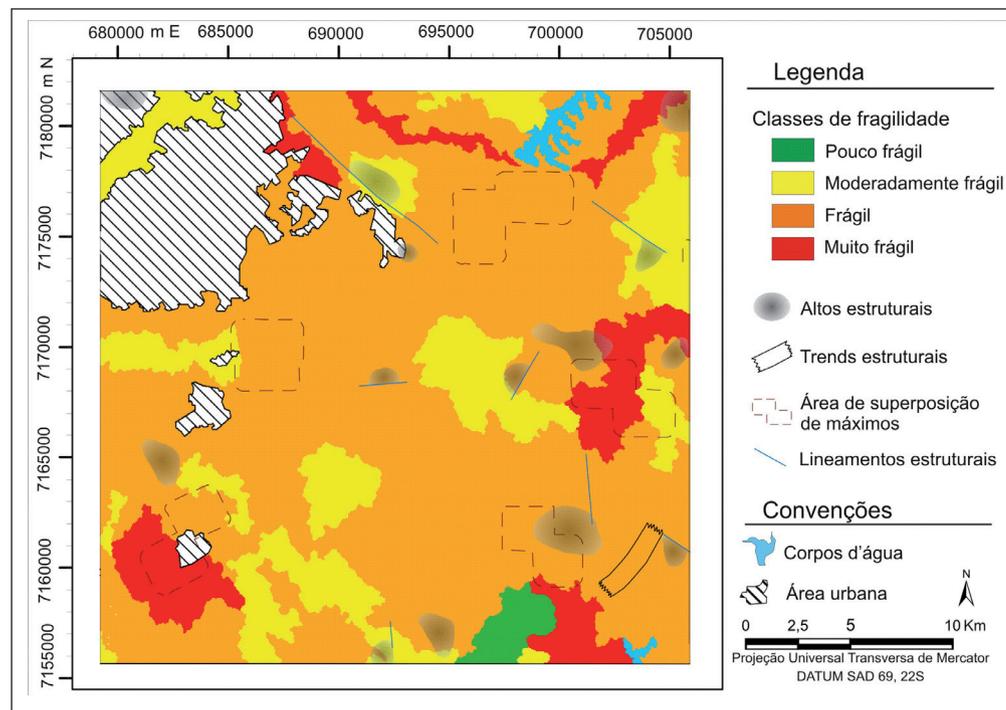
A Plasticidade x Ruptibilidade também é uma propriedade muito importante para esta problemática ambiental, pois possibilita identificar áreas com maior possibilidade de percolação de material. Como a percolabilidade depende do espaço vazio existente, ou não, na descontinuidade, esta propriedade recebeu menor peso para a análise em caso de acidentes de derramamento de petróleo e seus derivados.

A soma dos valores correspondentes às classes de cada propriedade gerou classes de fragilidade, quais sejam: *Muito frágil* (soma dos valores entre 21 e 24, em vermelho); *Frágil* (soma entre 16 e 20, em laranja); *Moderadamente frágil* (soma entre 11 e 15, em amarelo) e *Pouco frágil* (soma entre 6 e 10, em verde).

Sobrepostas às classes de fragilidade, apresentam-se algumas das feições obtidas no mapeamento morfoestrutural, considerados somente aqueles casos de maior gravidade quanto ao controle do material derramado.

Foram escolhidas, para tanto, áreas com altos estruturais (por representarem armadilhas a petróleo e derivados, além do caráter dispersivo), Trends estruturais e lineamentos estruturais que interceptam a primeira linha do contorno de altos estruturais e sobreposição de zonas de variação de máximos (casos que agravam a percolação do material devido ao alto grau de fraturamento e falhamento do terreno, contribuindo também para a dispersão de fluidos).

O resultado deste procedimento deu origem ao mapa síntese de fragilidade ambiental do meio físico a derramamento de petróleo e derivados, apresentado na Figura 4.



**Figura 4** – Mapa Síntese de Fragilidade ambiental do meio físico a derramamento de petróleo e derivados da região de São José dos Pinhais (PR).

A integração das informações citadas anteriormente possibilitou desenvolver um mapa síntese, posto que a representação de todas as feições dificultaria a interpretação por excesso de informação.

## 6 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida torna-se interessante à medida que proporcionou a representação em área das classes de fragilidade e feições agravantes. No entanto, é importante destacar que estas últimas representam uma área de tendência dos respectivos sistemas, e que não se deve considerar o limite mapeado como exato e abrupto.

A presença de uma unidade classificada como muito frágil, de uma superposição de zonas de variação de máximos, um alto estrutural e lineamento estrutural próximas à região metropolitana é preocupante. No aglomerado urbano há uma grande ocorrência de acidentes de trânsito que podem ocasionar em tombamento de caminhões que transportam derivados de petróleo, além da grande concentração de postos de abastecimento de combustíveis, que nem sempre estão dentro das normas ambientais. Estes tipos de derramamento,

temporalmente pontuais ou contínuos, podem representar um grande problema, pois a contaminação pode ocorrer em diferentes intensidades, levando a prejuízos ambientais, sociais e econômicos de diferentes graus.

É importante ressaltar que não se recomenda utilizar somente o mapa síntese para a resolução de problemas oriundos do derramamento de petróleo e seus derivados, pois a interpretação de todas as informações obtidas no Mapeamento Morfoestrutural, inclusive aqueles não cartografados no mapa síntese de fragilidade ambiental, contribuem para um melhor conhecimento das dinâmicas do meio físico, e conseqüentemente, para uma melhor tomada de decisão.

## AGRADECIMENTOS

*Sinceros agradecimentos à PETROBRAS pelo financiamento do projeto "Mapeamento do meio físico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamento de petróleo e derivados em ambientes continentais" e ao CEAPLA (Centro de Análise e Planejamento Ambiental - Unesp Rio Claro), pelo auxílio técnico e estrutural, sem os quais o presente trabalho não seria possível.*

## REFERÊNCIAS

- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. *Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico*. São José dos Campos: INPE, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná - escala 1:600.000*. 1981.
- GUILHERME, I. R.; FAITA, R.; RIEDEL, P. S.; SEMENSATTO, D. L.; MARQUES, C. M. SISAQ: Sistema de Informação para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE, 1, 2009, Bento Gonçalves. *Anais do...*, 2009, v. 1, p. 1299 - 1307.
- GUY, M. Quelques principes e quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: II Symposium International de Photo-Interpretation, 2, 1966, Paris. *II Symposium International de Photo-Interpretation: Acte*, 1966, v.1, p.21-41.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). *Cartas climáticas do Paraná*. Disponível em: <<http://www.iapar.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2009.
- MATTOS, J. T. de; SANTANA, M. A; OHARA, T. Imagens do satélite TM-Landsat para compartimentação do meio físico, visando planejamento regional: critérios interpretativos. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, n. 10, 2002, Cochabamba. *Anais do X Simposio Latinoamericano de Percepción Remota - CD-ROM*, Cochabamba: SELPER, 2002a.
- MATTOS, J. T. de; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R.; OHARA, T.; MENDES, M. L. de B.; SANTANA, M. A. Critérios para mapeamento de classes de risco a erosão de solos em imagem TM-Landsat. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, n. 10, 2002, Cochabamba. *Anais do X Simposio Latinoamericano de Percepción Remota - CD-ROM*, Cochabamba: SELPER, 2002b.
- OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C. (Coord.) *Atlas geomorfológico do Estado do Paraná*. Escala 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000/ Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 63p
- RIVEREAU, J. C. *Curso de fotointerpretação: notas de aula*. Série Didática, Brasília Departamento de Geociências - UnB, n. 4, 1970, 128p.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia - USP*. São Paulo, v. 8, 1994, p. 63 - 74.
- SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias Geomorfológicas*. Campinas, v. 6, n.32, 1976, p.71-104.
- SOARES P. C., LUZ M. E. R., REDAELLIR., GUERRA S. M. S. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2, 1982, Brasília. *Anais...* v. 1, p.157-168.
- VENEZIANI, P.; ANJOS, C. E. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia*. São José dos Campos, INPE, 1982, 54p.