

METODOLOGIAS PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS

Gilberto Câmara, José Simeão de Medeiros,

Cláudio Clemente F. Barbosa, Eduardo C.G. Camargo

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo procura discutir os diferentes usos de Geoprocessamento para aplicações ambientais. Partimos da perspectiva de que uma aplicação consistente de Geoprocessamento para análise ambiental deve conter três componentes:

- Uma metodologia de integração de dados que estabeleça a contribuição de cada variável geográfica para o resultado desejado;
- Um roteiro de trabalho, consistindo numa sequência de etapas a ser cumpridas, incluindo o levantamento, a análise e a síntese;
- Um conjunto de operações executáveis em um SIG, que materialize computacionalmente o procedimento do item (b).

Conforme estabelecemos na Seção 1 (Introdução), pode-se apontar pelo menos quatro grandes dimensões dos problemas ligados aos Estudos Ambientais, onde é grande o impacto do uso da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica: *Mapeamento Temático, Diagnóstico Ambiental, Avaliação de Impacto Ambiental, e Ordenamento Territorial*. Para resolver estes problemas, podemos agrupar de forma genérica, as diferentes metodologias de análise ambiental em duas grandes classes, discutidas no restante deste capítulo:

- Análises pontuais.
- Estudos baseados em áreas.

Uma terceira forma de trabalho são as análises baseadas em operações de vizinhança, com base em metodologias de geoestatística. Para esta discussão, o leitor deve referir-se ao capítulo 5.

A principal diferença entre as análises pontuais e as baseadas em área é o uso, respectivamente, de critérios de *divisão lógica (top-down)*, e critérios de *agrupamento (bottom-up)* para realizar análises espaciais. Ross (1995) denomina o

primeiro caso de “pesquisas ambientais multitemáticas” e o segundo, de “land-systems”.

Nas pesquisas ambientais multitemáticas, são gerados múltiplos produtos temáticos disciplinares, uns com características analíticas e outros de síntese, sob uma orientação multi e interdisciplinar. Numa primeira fase são gerados produtos temático-analíticos que tratam de forma setorizada os temas da natureza (climatologia, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e fauna) e da sócio-economia (demografia, qualidade de vida, legislação, uso da terra, estruturas regionais e urbanas). Posteriormente estes produtos são integrados de maneira a atender aos objetivos propostos. (Ross, 1995).

Os procedimentos operacionais com a denominação genérica de “*land systems*” utilizam como referencial padrões fisionômicos do terreno (padrões de paisagens ou *unidades de paisagens*) e geram como resultados produtos temáticos analíticos-sintéticos. O território é seccionado em diversas unidades de paisagem que retratam de forma integrada certas particularidades (climáticas, geológicas, geomorfológicas, pedológicas, da cobertura vegetal, uso da terra e sócio-econômicas) que as individualizam do entorno (Ross, 1995).

6.2 OPERAÇÕES PONTUAIS

6.2.1 Premissas de Trabalho

Nos estudos de análise integrada como operações pontuais, cada uma das localizações geográficas analisadas é considerada de forma independente de seus vizinhos e a integração de dados é feita utilizando operadores pontuais, sem considerar os relacionamentos espaciais de vizinhança e entorno.

A hipótese implícita nestes casos é que os dados apresentam alto grau de autocorrelação espacial. Em outras palavras, vale o princípio de que “coisas próximas são parecidas”. Esta suposição pode não se verificar na prática, seja por causa da variabilidade natural, seja por inconsistência dos dados utilizados.

6.2.2 Análises Pontuais Qualitativas- Aptidão Agrícola

Em grande quantidade de estudos ambientais, os dados disponíveis são apresentados sob forma de mapas temáticos tradicionais, provenientes de levantamentos qualitativos. Nestes casos, pode não ser possível ou factível estabelecer modelos numéricos que capturem de forma plena a natureza contínua

das variações espaciais das grandezas em estudo e o uso de regras booleanas pode ser a única forma de realizar estudos de análise ambiental (Burrough, 1998).

Um caso onde tem sido preconizado o uso de metodologias qualitativas são os estudos de aptidão agrícola, onde um dos dados básicos – o mapa de solos – é fornecido com um mapa temático, com unidades separadas por limites definidos. Os dados originais de levantamento de campo (perfis) utilizados para a geração do mapa de solos podem não estar disponíveis ou possuir baixa densidade para uso de técnicas de geo-estatística. Neste caso, metodologias de aptidão agrícola como as preconizadas pela EMBRAPA (Ramalho Filho e Beek, 1995) estabelecem um conjunto de regras de decisão.

Ramalho Filho e Beek (1995) indicam que a aptidão agrícola de terra pode ser caracterizada a partir de cinco fatores:

- Deficiência de fertilidade.
- Deficiência de água.
- Excesso de água ou deficiência de oxigênio.
- Suscetibilidade à erosão.
- Impedimentos à mecanização.

Para cada caso, os autores consideram cinco graus de limitação: **Nulo**, **Ligeiro**, **Moderado**, **Forte** ou **Muito Forte**. Levam ainda em conta o grau de mecanização e manejo e estabelecem quadros-guia que, com base nas limitações consideradas, determinam quatro classes de aptidão agrícola (**boa**, **regular**, **restrita** e **inapta**) para cada utilização possível da terra.

Com base no trabalho de Ramalho Filho e Beek (1995), um exemplo de programa de Álgebra de Mapas em LEGAL é mostrado na Figura 6.1. Neste exemplo, considera-se apenas um tipo de uso da terra (lavoura), no clima tropical-úmido, e com elevado grau de manejo. O exemplo ilustra ainda uma situação típica de análises booleanas em Geoprocessamento: É necessário prever todas as combinações possíveis dos dados de entrada (ou pelo menos uma parte significativa destas), o que conduz a um grande número de cláusulas.

Apesar da importante contribuição de estudos de integração de dados como os de Ramalho Filho e Beek, o uso de metodologias qualitativas tem sido criticado na literatura, devido às limitações das hipóteses de base para tais operações. O modelo booleano parte da premissa que as variáveis geográficas podem ser descritas e medidas com exatidão. Na realidade, esta premissa dificilmente é verificada devido à incerteza inerente nos levantamentos espaciais. Heuvelink e Burrough (1993) analisaram a propagação de erro em análises booleanas, e compararam os resultados com os obtidos com técnicas de classificação contínua

(descritas no capítulo 4), e chegaram à conclusão que os métodos booleanos eram muito mais sensíveis às variações inerentes aos dados espaciais.

Em resumo, a realização de análises booleanas requer um trabalho exaustivo de preparação e adequação dos dados temáticos, que possa assegurar a máxima correlação possível entre as diferentes variáveis geográficas.

```

{
// Declaracao das variaveis
Tematico defFertil ("DeficienciaFertilidade");
Tematico defAgua ("DeficienciaAgua");
Tematico excAgua ("ExcessoAgua");
Tematico sucErosao ("SusceptibilidadeErosao");
Tematico impMecan ("ImpedimentosMecanizacao");
Tematico aptdLavouraMecan ("AptidaoAgricola");
// Instanciacao das variaveis
defFertil = Recuperere (Nome = "defFertil");
defAgua = Recuperere (Nome = "defAgua");
excAgua = Recuperere (Nome = "excAgua");
sucErosao = Recuperere (Nome = "sucErosao");
impMecan = Recuperere (Nome = "impMecan");
aptdLavouraMecan = Novo (Nome = "aptdLavouraMecan", ResX = 100,
ResY = 100, Escala = 100000);
// Regras booleanas para aptidao agricola de terras
aptdLavouraMecan = Atribua (
    CategoriaFim = "AptidaoAgricola",
    { "Boa" : defFertil.Classe = "Nula" &&
        defAgua.Classe = "Nula" ||
        defAgua.Classe = "Ligeira" &&
        excAgua.Classe = "Nula" ||
        excAgua.Classe = "Ligeira" &&
        sucErosao.Classe = "Nula" &&
        impMecan.Classe = "Nula";
        (... )
    }
}

```

Figura 6.1 - Trecho do programa em LEGAL para determinação de aptidão agrícola de terras segundo a metodologia de Ramalho Filho e Beek (1995).

6.2.3 Análise Integrada por Modelagem Quantitativa

Definimos *modelagem* como um processo de predição de fenômenos geográficos, baseado em modelos matemáticos que descrevam a evolução de uma grandeza. Um exemplo é a equação universal de perda de solo (USLE – *universal soil loss equation*), usado por Kuntschik (1996) que, trabalhando na microbacia do Ribeirão das Araras, em Araras, no Estado de São Paulo, implementou um modelo para a estimativa da perda de solos por erosão hídrica. Todo o projeto foi desenvolvido na escala 1: 50.000.

Para tanto, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento, visando identificar dentro desta bacia, as regiões com maior susceptibilidade à perda de solos por erosão hídrica. O modelo escolhido é a Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Este modelo leva em conta seis fatores: erosividade, dada pela capacidade da chuva de provocar desprendimento e arrasto de solo, erodibilidade, que quantifica a susceptibilidade de um solo a ser erodido pela chuva, fator topográfico que considera comprimento de encosta e declividade, e o fator antrópico, que inclui cobertura e uso do solo e práticas conservacionistas.

A partir do mapa de solos, cartas topográficas e dos valores numéricos correspondentes a cada fator considerado, foram criados arquivos matriciais em formato ASCII. Nestes arquivos, cada número representa o valor da grandeza para uma área quadrada de 250 m de lado no terreno. Estes arquivos foram tratados através de planilhas de cálculo e das funções disponíveis no SIG, sendo gerados os mapas de potencial natural de erosão (PNE) e de perdas solos calculadas (A), conforme mostram as Figuras 6.2 e 6.3.

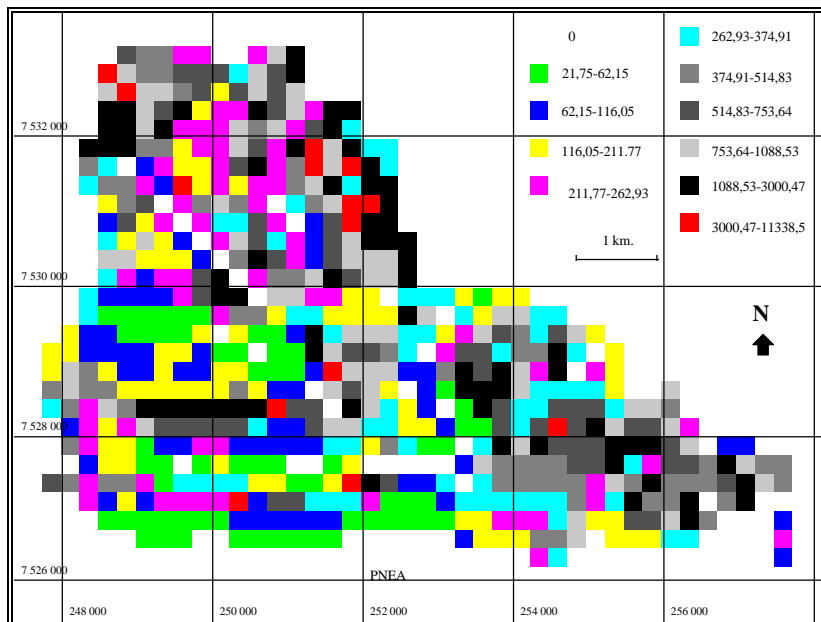


Figura 6.2. Potencial Natural de Erosão Anual (em ton./ha.ano⁻¹). Fonte: Kuntschik (1996).

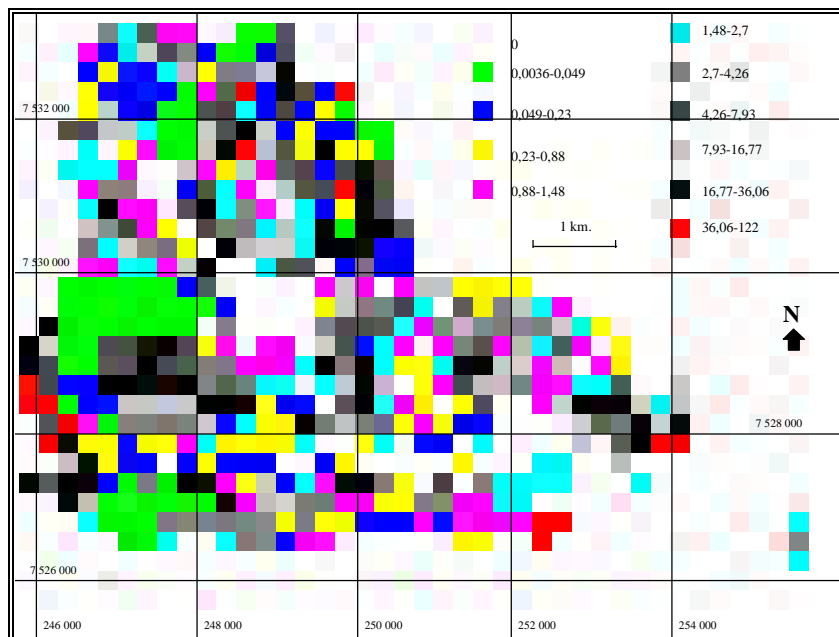


Figura 6.3. Perda de Solo Calculada (em ton./ha.ano⁻¹) Fonte: Kuntschik (1996).

O potencial natural de erosão é dado pela seguinte equação:

$$PNE = R * K * LS$$

onde: R é erosividade da chuva anual, K é a erodibilidade do solo e LS é uma variável calculada a partir do comprimento da encosta L e declividade média S através da fórmula

$$LS = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18}$$

A erosividade da chuva (R) é dada por:

$$R = 67.335 (p^2/P)^{0.85}$$

onde p é a precipitação média mensal e P é a precipitação média anual.

Neste exemplo para a bacia do Ribeirão das Araras na região de Araras o valor de R corresponde a 6675. A erodibilidade do solo (K), ou seja a resistência deste à ação da chuva, depende diretamente do tipo de solo em questão. Para cada tipo de solo há um valor associado de acordo com a tabela proposta por Lombardi Neto (1995).

A partir do mapa de altimetria, gerou-se um modelo numérico de terreno utilizando-se o interpolador TIN (grade triangular). Desta grade, gerou-se outra grade de declividade e um mapa temático com classes de declividade. O valor do comprimento da encosta (L), ou percurso da água, foi obtido a partir de um mapa de distância entre o limite da bacia e os níveis mais baixos de altimetria, resultando em um modelo numérico do terreno.

A partir desta formulação metodológica, apresentamos a seguir um programa em LEGAL que realiza este procedimento. O LEGAL foi utilizado para:

- converter o mapa de solos em uma grade de valores de erodibilidade, utilizando-se a função PONDERE;
- converter o mapa de classes de declividade em uma grade de valores médios de declividade, utilizando o valor central de cada intervalo, também através da função PONDERE;
- aplicar a equação universal de perda de solo considerando todos os parâmetros acima, gerando uma grade onde cada ponto da superfície está associado ao valor de potencial natural de erosão.

Apresenta-se a seguir a sintaxe utilizada:

```
{
//Declaração das variáveis

Tematico solo ("solo"), decl ("declive");

Numerico S ("decliv-media"), K ("erodibilidade"),
          L ("encosta"), LS ("LS"), pne ("PNE");

Float    R = 6675.;

Tabela tabk (Ponderacao),      tabs (Ponderacao);

// Transforma Declividade em (S )declividade media

decl= Recuperere(Nome = "Declividade");

S = Novo ( Nome = "DeclivMedia",      Representacao = Matriz,
          ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max = 50);

tabs = Novo(CategoriaIni="declive",

            "0-3" : 1.5,              "3-6" : 4.5,
            "6-12" : 9.0,             "12-20" : 16.0,
            "20-40" : 30.0,           ">40" : 40.0 );

S = Pondere (decl,tabs);

//Transf. solo em erodibilidade (K)

solo= Recuperere(Nome = "TiposdeSolo");

K = Novo (Nome ="Erodibilidade(K)", Representacao = Grade,
          ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max = 1);

tabk = Novo (CategoriaIni = "solo",

             "pv2alva" : 0.0462,      "pv3Olaria" : 0.0280,
             "pv3+pv4" : 0.028,       "lrd+le1" : 0.0143,
             "lrdbaraogeraldo" : 0.0128,   "lreribpreto" : 0.0098,
             "le1+lrd" : 0.01514,        "LV4+LV3" : 0.0132
             "lvsmatodentro" : 0.0246,    "te" : 0.0181,
             "serrinha" : 0.0462 ,        "pv2usina" : 0.0462,
             "li3" : 0.0442,            "pv5" : 0.0462,
```



```
"li2" : 0.0362 ,                "urbano" : 0,
"li2+pv4" : 0.03292,          "lrd+lre" : 0.0116 ,
"le1" : 0.0167,              "agua" : 0,
"lv4speculas" : 0.0132,      "LV3LaranjAzeda" : 0.0132);

K = Pondere (solo, tabk);

// Calculo de LS

L= Recuperere(Nome ="L-CompEncosta");

LS = Novo (Nome = "LS", Representacao = Grade,
           ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max = 100
);

LS= 0.00984 * (L^0.63)* (S^1.18);

// Calculo de PNE

PNE = Novo (Nome = "PotNatErosao", Representacao = Grade,
            ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max =
100);

PNE = R*K*LS;

}
```

6.2.4 Comparação entre Modelos Booleanos e Quantitativos – Caso de Pesquisa Geológica

Um outro exemplo de uso de análise pontual qualitativa foi o estudo realizado por Almeida Filho (...) para demonstrar o uso de técnicas de processamento e análise espacial de dados digitais multifonte na pesquisa mineral. Como área de estudo foi escolhido o planalto de Poços de Caldas, o qual encerra mineralizações radioativas de urânio e tório. Por possuir uma boa base de informações, aquela área é adequada a estudos demonstrativos-metodológicos dessa natureza, permitindo a criação de um banco de dados digitais geocodificados para manipulação em computador. Conhecimentos geológicos prévios sobre a área, permitirão avaliar a eficácia da metodologia empregada.

Características Gerais da Área de Estudo

O planalto de Poços de Caldas, na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, constitui uma estrutura em forma de cratera vulcânica grosseiramente circular, com cerca de 705 km². A cidade de Poços de Caldas, a qual tem como atividades econômicas principais a mineração (bauxita, argilas, minerais radioativos) e o turismo ligado à suas águas e ao clima agradável, localiza-se na borda norte dessa cratera. A Figura 6.2 mostra o planalto de Poços de Caldas através de uma composição colorida obtida com imagens do satélite Landsat-1. Como referência estão indicadas a cidade de Poços de Caldas, principais drenagens, vias de acesso etc, extraídas de cartas planimétricas da região.

Do ponto de vista geológico, o planalto é constituído por rochas mesozóicas-cenozóicas, representadas em sua maioria por nefelina-sienitos, os quais ocorrem como fácies efusivas, hipabissais e plutônicas, além de material de natureza vulcânica. Datações geocronológicas pelo método K-Ar (Bushee, 1970) indicam que os fenômenos geológicos que formaram a cratera teriam ocorrido entre 87 e 53 milhões de anos atrás. As águas termais da região são as últimas manifestações desse episódio.

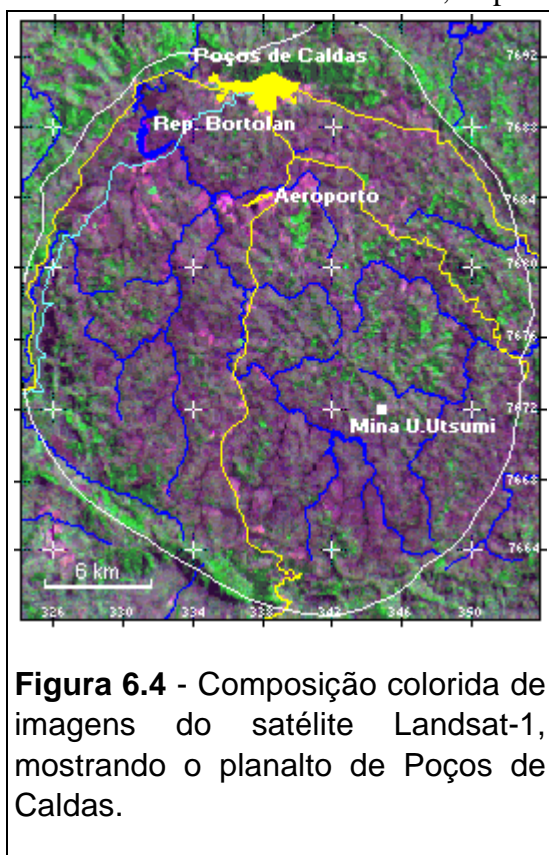


Figura 6.4 - Composição colorida de imagens do satélite Landsat-1, mostrando o planalto de Poços de Caldas.

Quarenta e oito locais de mineralizações radioativas (incluindo depósitos e simples ocorrências) são conhecidos no planalto de Poços de Caldas, as quais podem ser agrupadas em três associações distintas, de acordo com a paragênese mineral: urânio-zircônio (U-Zr), tório-terras raras (Th-TR) e urânio-molibdênio (U-Mo). A associação urânio-zircônio constitui os depósitos mais comuns e freqüentes, mas não encerra importância econômica. A associação tório-terras raras constitui o segundo tipo de mineralização radioativa encontrada na área, representada principalmente pela jazida de Morro do Ferro, na parte central do planalto. A associação urânio-molibdênio constitui os depósitos uraníferos mais

importantes, representados principalmente pela jazida de Campo do Agostinho e pela mina Usamu Tsumi, na parte centro-sudeste do planalto. Para sua exploração foi criado, em meados da década de setenta, o Complexo Mineiro-Industrial de Poços de Caldas que produziria concentrado de urânio (*yellow cake*), destinado ao abastecimento das usinas nucleares brasileiras então planejadas.

Com base em análises de trabalhos geológicos realizados por pesquisadores que estudaram a região em diferentes épocas e com diferentes enfoques (Ellert, 1959; Tolbert, 1966; Wedow Jr., 1967; Oliveira, 1974; Almeida Filho & Paradella, 1976; Fraenkel et al., 1985), foram identificadas três características comuns às mineralizações radioativas no planalto, a saber:

(a) A mineralização mostra afinidade genética com três tipos de litologias: tinguítos hidrotermalizados (rocha potássica), corpos intrusivos de foiaítos e rochas vulcânicas;

(b) Essas litologias são cortadas por falhamentos/fraturamentos e estruturas circulares que criaram condutos para o alojamento de veios e lentes mineralizados;

(c) Dados de radiometria gama mostram valores anômalos de radioatividade total, indicativos da presença de minerais radioativos.

As três características acima (litologias favoráveis, feições estruturais e dados gama-radiométricos) foram adotadas como critérios diagnósticos para a pesquisa de minerais radiativos no planalto de Poços de Caldas. Poderia ser argumentado que apenas o último critério já seria suficiente para identificar áreas potenciais, por ser indicação direta da presença de minerais radioativos. Entretanto, variações locais na espessura de solos e cobertura vegetal, fazem com que áreas sem interesse prospectivo mostrem valores anômalos, enquanto depósitos importantes podem ser indicados apenas por valores intermediários de intensidade radioativa. Desse modo, dados radiométricos devem ser considerados apenas se ocorrem em áreas de características geológicas favoráveis, tornando-se indispensável agregar a eles informações derivadas de outras fontes.

Uma vez definidos os critérios diagnósticos, o passo seguinte constou da criação de um banco de dados digitais geocodificados, composto por:

Imagens Landsat - Imagens do *Multispectral Scanner* (MSS) do satélite Landsat-1, obtidas em setembro de 1972, sob ângulo de elevação solar de 44° e azimute de 58°. Deu-se preferência às imagens mais antigas, para reduzir a influência da atividade antrópica, que dificulta a interpretação fotogeológica.

Dados planimétricos - Cidade, estradas, ferrovia, drenagens etc, digitalizadas a partir das cartas acima mencionadas, usadas como parâmetros de referência e localização.

Dados litológicos - Litologias potenciais para a pesquisa de minerais radioativos, representadas por rocha potássica, corpos intrusivos de foiditos e rochas vulcânicas (Figura 6.5), digitalizadas do Mapa Geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (Nuclebrás, 1975a).

Dados estruturais - Extraídos das imagens Landsat-MSS, as quais foram realçadas por técnicas de ampliação linear de contraste e interpretadas (como bandas individuais ou composições coloridas falsa cor) diretamente no monitor de vídeo, usando-se o *mouse* para traçar as feições interpretadas. Dois grupos de feições foram identificados: (a) lineamentos, representando traços de falhas/fraturas; e (b) estruturas circulares, indicativas de edifícios vulcânicos secundários, no interior da cratera principal (Figura 6.6). Esses dois tipos de feições constituem controles estruturais regionais de primeira ordem para as mineralizações radioativas, responsáveis pela criação de condutos que permitiram a percolação de soluções hidrotermais e deposição do minério. Elas foram representadas em duas dimensões, através da criação de "corredores" com 250 e

350 metros de largura ao longo de falhas/fraturas e estruturas circulares, respectivamente. Esses corredores representariam a área de influência das feições estruturais, assumindo-se que qualquer ponto dentro deles estaria posicionado sobre a feição estrutural considerada.

Dados gama-radiométricos - Obtidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN, a partir de levantamentos com helicóptero e a pé. No primeiro caso os dados foram coletados em malha de 250 x 250 metros, a uma altura média de 7,5 metros do terreno, enquanto nos levantamentos a pé a malha foi de 75 x 200 metros. Esses dados, na forma de radioatividade total, foram digitalizados a partir do Mapa Radiométrico do Planalto de Poços de Caldas (Nuclebrás 1975b), organizados em quatro intervalos de intensidade radioativa, em relação a um *background* regional de 40 unidades, a saber: 1,3-1,8; 1,8-2,5; 2,5-3,5; e maior do que 3,5 vezes o *background* regional (Figura 6.7).

Ocorrências minerais radioativas - Mineralizações radioativas conhecidas na área foram incorporadas como símbolos ao banco de dados, não se fazendo distinção se se tratava de depósitos importantes ou de simples ocorrências minerais. Por representarem dados de "verdade terrestre", elas constituem parâmetros de aferição dos resultados. Se áreas indicadas como potenciais mostrarem-se coerentes em relação a mineralizações conhecidas, o modelo prospectivo pode ser considerado confiável.

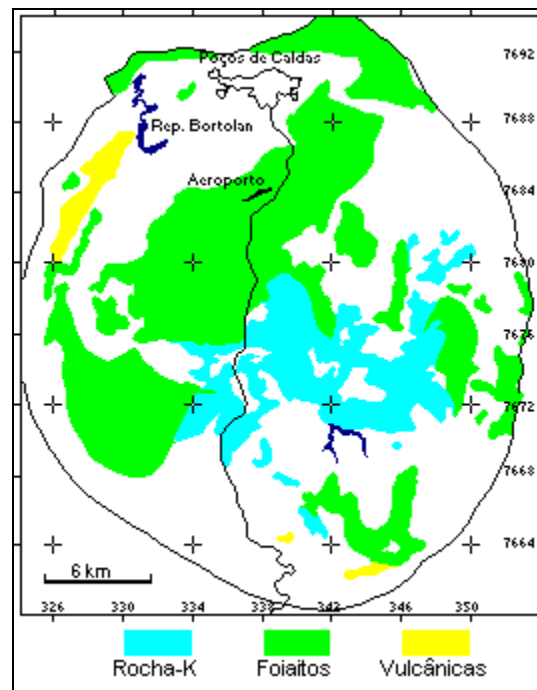


Figura 6.5 - Mapa de litologias potenciais para a ocorrência de mineralizações radioativas.

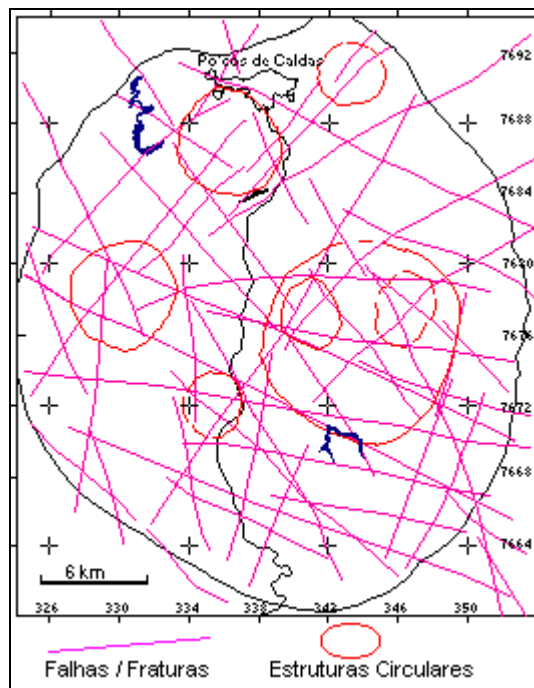


Figura 6.6 - Mapa de lineamentos, indicando falhas/fraturas e estruturas circulares.

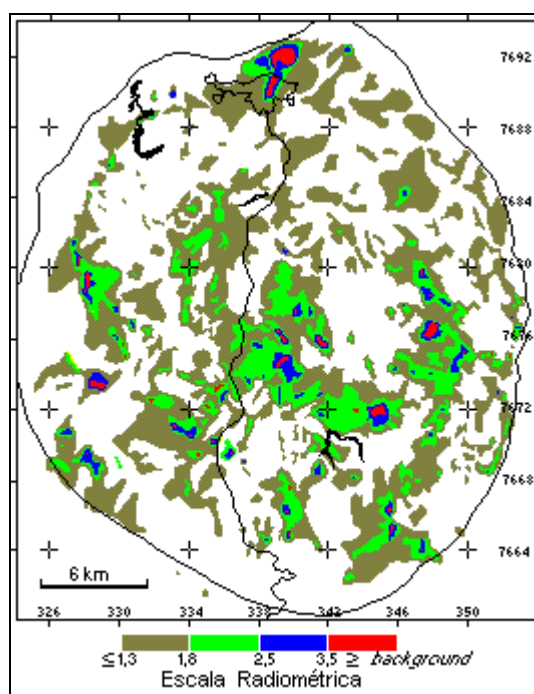


Figura 6.7 - Mapa de anomalias gama-radiométricas no planalto de Poços de Caldas.

Modelo Prospectivo Usando Operações Booleanas

Com base nos critérios diagnósticos já definidos, uma área poderia ser considerada potencial quando nela ocorrerem concomitantemente:

- (a) Litologias potenciais, representadas por rochas potássicas (A), corpos intrusivos de foiaítos (B), ou rochas vulcânicas (C);
- (b) Feições estruturais, indicativas de falhas/fraturas (D), ou estruturas circulares (E), que cortam litologias potenciais; e
- (c) Valores gama-radiométricos (F), a partir de 1,8 vez o *background* regional (limiar arbitrado com base no valor médio encontrado em depósitos de urânio da área).

Para mapear as áreas de ocorrências dos critérios diagnósticos acima indicados, empregou-se a seguinte equação de álgebra booleana:

$$\{(A \text{ or } B \text{ or } C) \text{ and } (D \text{ or } E)\} \text{ and } F \text{ ### ÁREAS POTENCIAIS}$$

A Figura 6.8 é o mapa das áreas potenciais para pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas, com base na equação acima. Essas áreas cobrem uma superfície de 88,5 km², correspondentes a apenas 12% da região total investigada. Observando-se a distribuição das mineralizações, verifica-se que 77% delas ocorrem em áreas indicadas como potenciais. Nas restantes 23% encontra-se ausente pelo menos um dos três critérios diagnósticos. Constata-se ainda que dos três tipos de mineralizações radioativas conhecidas, aquelas do tipo U-Zr predominam nas regiões leste e oeste/sudoeste, enquanto as dos tipos U-Mo e Th-TR, concentram-se na região central do planalto. A boa correlação entre áreas apontadas como potenciais e as mineralizações conhecidas na região, confere confiabilidade ao modelo prospectivo adotado.

A principal desvantagem do modelo baseado em operações binárias é o fato das áreas indicadas terem prioridades idênticas para pesquisa. Visando um refinamento desses resultados, o mesmo conjunto de dados foi analisado utilizando um modelo baseado em médias ponderadas, o qual permite priorizar as áreas, de acordo com o potencial prospectivo das mesmas.

Modelo Prospectivo Usando Médias Ponderadas

Neste tipo de modelo, pesos são atribuídos aos critérios diagnósticos e às suas respectivas classes (*e.g.* critério diagnóstico litologia, classe rocha potássica), calculando-se uma imagem de médias ponderadas, a qual representa uma combinação particular e única dos dados para cada área unitária do terreno. A definição dos pesos é a ação mais crítica a ser tomada para a aplicação do modelo.

O procedimento de atribuir pesos a parâmetros pertencentes a uma cadeia de eventos e utilizar equações aritméticas visando à tomada de decisões, é conhecido na área de inteligência artificial como *equação neuronal de Rosenblat*. A definição desses pesos pode ser feita de duas maneiras: através de procedimentos heurísticos, nos quais a experiência pessoal é o fator determinante; ou utilizando-se técnicas *fuzzy logic* (Zadeh, 1965), as quais procuram estabelecer critérios de enquadramento do conjunto de dados, definindo limites ou graus de confiança. A despeito do desenvolvimento dessas técnicas, a definição heurística de pesos continua sendo amplamente aceita como base para sistemas especialistas, de modo particular em situações onde a teoria e os modelos empíricos de comportamento dos dados não estão bem estabelecidos (Veiga & Meech, 1994). Este procedimento é particularmente válido em pesquisa mineral, que muitas vezes segue uma abordagem técnica-intuitiva, onde os conceitos são aplicados por analogia, na expectativa de repetições de relações já conhecidas.

Adotou o procedimento heurístico para a definição dos pesos, atribuindo-se os seguintes valores:

(a) dados gama-radiométricos: $\omega_{\text{crit}} = 80$ e $\omega_{\text{classe}} = 0, 10, 60, 70$ e 80 para as seguintes classes de intensidades radioativas: *background*; 1,3-1,8; 1,8-2,5; 2,5-3,5; e $>3,5$; respectivamente;

(b) dados litológicos: $\omega_{\text{crit}} = 60$ e $\omega_{\text{classe}} = 60, 30$ e 20 para as classes rochas potássicas, foiaítos e material vulcânico, respectivamente; e

(c) dados estruturais: $\omega_{\text{crit}} = 20$ e $\omega_{\text{classe}} = 20$ para falhas/fraturas e estruturas circulares.

As médias ponderadas foram calculadas usando-se a seguinte equação:

$$E = \sum [(\omega_{\text{crit}}) * (\omega_{\text{classe}})] / \sum (\omega_{\text{crit}}) \rightarrow \text{ÁREAS POTENCIAIS}$$

onde,

E= valor da média ponderada

ω_{crit} = pesos atribuídos aos critérios diagnósticos;

ω_{classe} = pesos atribuídos às classes dos critérios diagnósticos.

É fácil deduzir dos dados acima que as médias ponderadas para a área de estudo ficaram compreendidas entre [0, 65], extremos que indicam, respectivamente, prioridades nula e máxima para a pesquisa de minerais

radioativos. A título de exemplo, áreas com média ponderada 60 corresponderam a locais de ocorrências de rochas potássicas, cortadas por falhamentos e com valores de intensidade radioativa entre 2,5 e 3,5 vezes o *background* regional.

O mapa da Figura 6.9 mostra áreas com diferentes prioridades para a prospecção de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas. Este mapa foi gerado a partir do fatiamento da imagem de médias ponderadas, representando os seguintes intervalos de pesos: 0-20; 20-35; 35-45; 45-55; e 55-65. Às áreas definidas por esses intervalos foram atribuídas prioridades para pesquisa ditas nula, baixa, média, alta e muito alta, respectivamente.

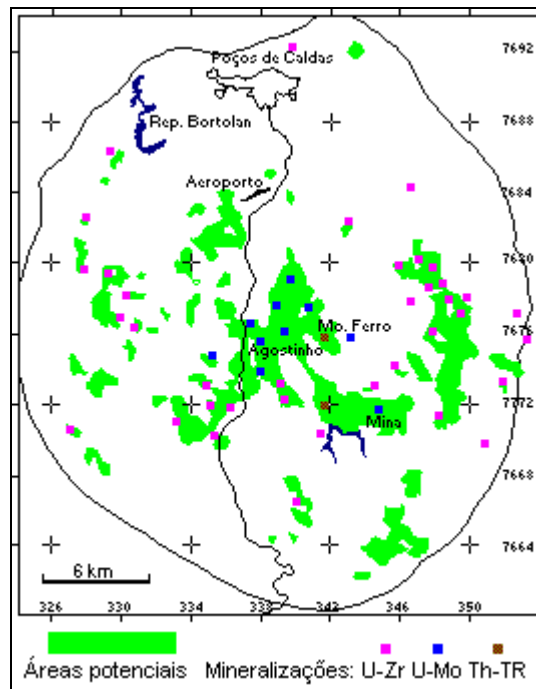


Figura 6.8 - Mapa de áreas potenciais para a pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas, segundo método baseado em álgebra booleana.

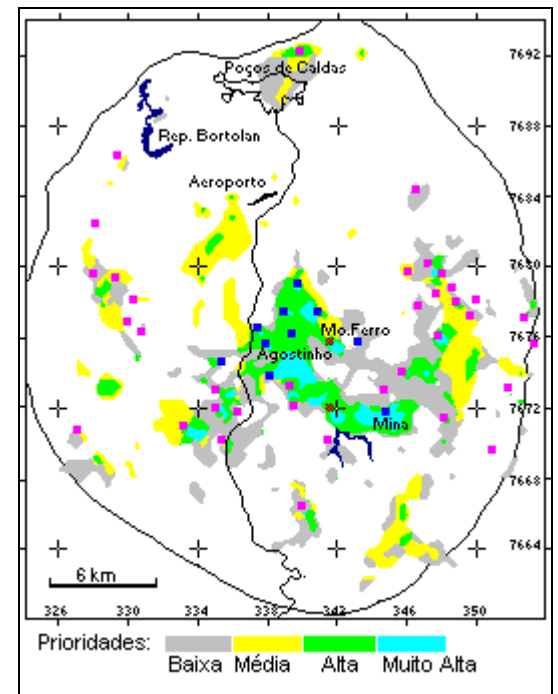


Figura 6.9 - Mapa de áreas com diferentes prioridades para a pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas, segundo modelo de médias ponderadas.

A Tabela 6.1 resume algumas características das áreas potenciais mostradas na Figura 6.9. Apenas 14% das mineralizações, todas sem importância econômica (U-Zr), localizam-se fora das áreas potenciais, contra 23% obtidos no método baseado em operações binárias. De acordo com os dados da tabela, 76% do planalto são descartados, *a priori*, para pesquisa. Os restantes 24% indicados com potenciais para a ocorrência de algum tipo de mineralização radioativa, são distribuídos da seguinte maneira:

- Áreas de prioridade baixa perfazem cerca de 11% da superfície total do planalto, encerrando mineralizações radioativas do tipo U-Zr, sem interesse econômico.
- Áreas de prioridades média perfazem cerca de 7% da superfície total do planalto, encerrando também mineralizações radioativas do tipo U-Zr.
- Áreas de prioridade alta correspondem a 4,5% da superfície do planalto e encerram 30 das mineralizações tipo U-Mo.
- Áreas de prioridade muito alta perfazem apenas 1,5% da superfície total do planalto. Apesar de suas dimensões reduzidas, essas áreas encerram 60% das mineralizações U-Mo (incluindo o depósito de Campo do Agostinho e a mina Usamu Utsumi) e 100% dos depósitos tipo Th-TR.

Prioridades de Pesquisa	Dimensões das Áreas Potenciais		Porcentagens por tipo de Mineralização		
	Km ²	%	U-Zr	U-Mo	Th-TR
**					
Muito Alta	10,6	1,5	6%	60%	100%
Alta	34,2	4,7	25%	30%	-
Média	49,2	6,8	19%	-	-
Baixa	78,5	10,9	36%	10%	-
Nula	546,0	76,0	14%	-	-

Tabela 6.1 - Dados estatísticos do modelo prospectivo baseado em médias ponderadas.

Os resultados obtidos no planalto de Poços de Caldas confirmam a alta eficácia de modelos semi-quantitativos de prospecção mineral, através de técnicas de Geoprocessamento. Eles revestem-se de grande importância prática, ao restringirem, drasticamente, áreas a serem investigadas em campo, o que implica em substancial economia de tempo e recursos em qualquer campanha de prospecção mineral.

6.3 ESTUDOS BASEADOS EM ÁREAS

6.3.1 Hipóteses de Trabalho

Os conceitos de “área” e de “integração” foram apresentados por Hartshorne (1978), como elementos básicos de uma sistemática de estudos geográficos, denominada pelo autor de “estudos de variação de áreas”. Na visão de Hartshorne, uma área-unidade (*unit-area*) é uma partição do espaço geográfico, definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, que apresenta características individuais próprias; estas áreas-unidades seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço. A partir da decomposição do espaço em áreas-unidade, o pesquisador poderá relacionar, para cada uma destas partições, as correspondentes características físicas-bióticas que a individualizam em relação a todas as demais componentes do espaço.

Hartshorne argumenta que o caráter de cada área seria dado pela integração das diferentes variáveis geográficas, tomadas em conjunto. Moraes (1997) assim exemplifica o método proposto por Hartshorne:

“O pesquisador seleciona dois ou mais fenômenos (p.ex. clima, produção agrícola, tecnologia disponível), observa-os, relaciona-os; repete várias vezes este procedimento, tentando abarcar o maior número de fenômenos (tipo de solo, destinação da produção, número de cidades, tamanho do mercado consumidor, hidrografia, etc). Uma vez de posse de vários fenômenos agrupados e interrelacionados, integra-os. (...) Este processo pode ser repetido várias vezes, até o pesquisador compreender o caráter da área enfocada (...)

*O pesquisador pode parar na primeira integração, e reproduzir a análise (tomando os mesmos fenômenos e fazendo as mesmas interrelações) em outros lugares. As comparações das integrações obtidas permitiriam chegar a um **padrão de variação** daqueles fenômenos tratados”.*

A proposta de Hartshorne contribuiu para dar uma base metodológica para o uso do conceito de “área” em Geoprocessamento. Neste caso, existe uma dimensão teleológica envolvida na análise. A delimitação de áreas previamente à integração de dados, garante uma consistência dos resultados, ao evitar os efeitos indesejáveis das análises booleanas pontuais.

6.3.2 Reclassificação de Unidades de Paisagem

Um exemplo de estudos baseados em áreas é a metodologia empregada em Batistella (1993) para realizar a cartografia fitoecológica do arquipélago de Fernando de Noronha. A partir da interpretação visual de fotos aéreas, foram delimitadas 618 regiões homogêneas, que foram a base de um trabalho de campo. Para cada região homogênea, foi feito um questionário (que corresponde aos atributos descritivos) para 54 descritores, que incluem: formação vegetal dominantes, acomodação da vegetação pelo vento, regularidade de estrutura vegetal e acomodação da vegetação pelo vento. A Figura 6.10 indica as regiões homogêneas, oriundas da fotointerpretação.

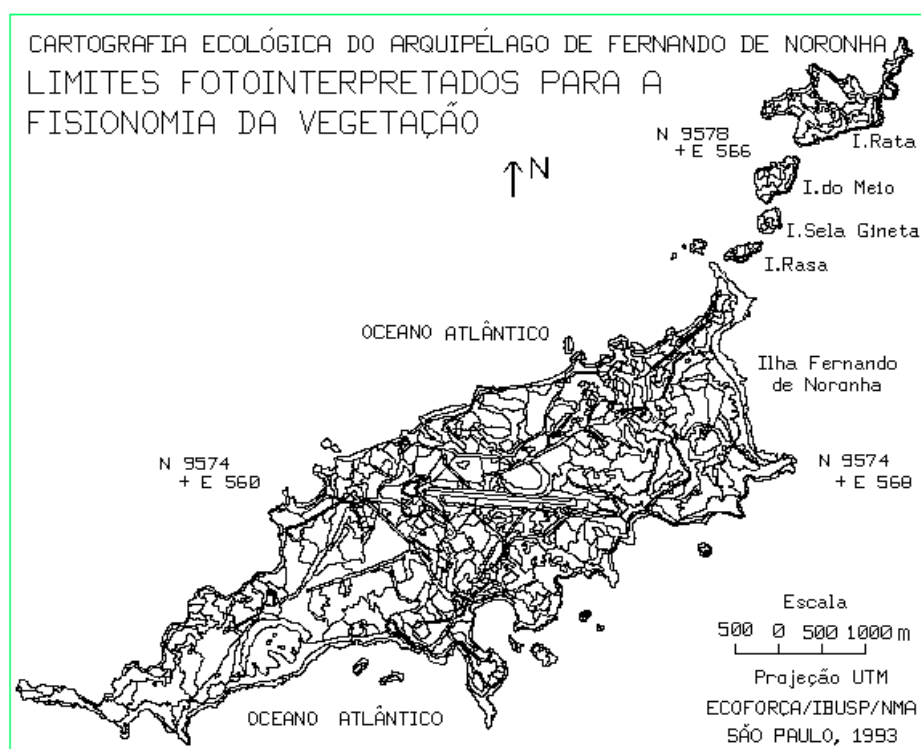


Figura 6.10 - Unidades homogêneas obtidas por fotointerpretação. Fonte: Batistella (1993).

Este trabalho de campo permitiu a criação de um banco de dados onde cada região possuía 54 atributos. A partir desta informação, foi possível gerar 78 mapas temáticos básicos e derivados, correspondendo aos temas do levantamento. Um dos mapas gerados (regularidade da estrutura vegetal) está mostrado na Figura 6.11.

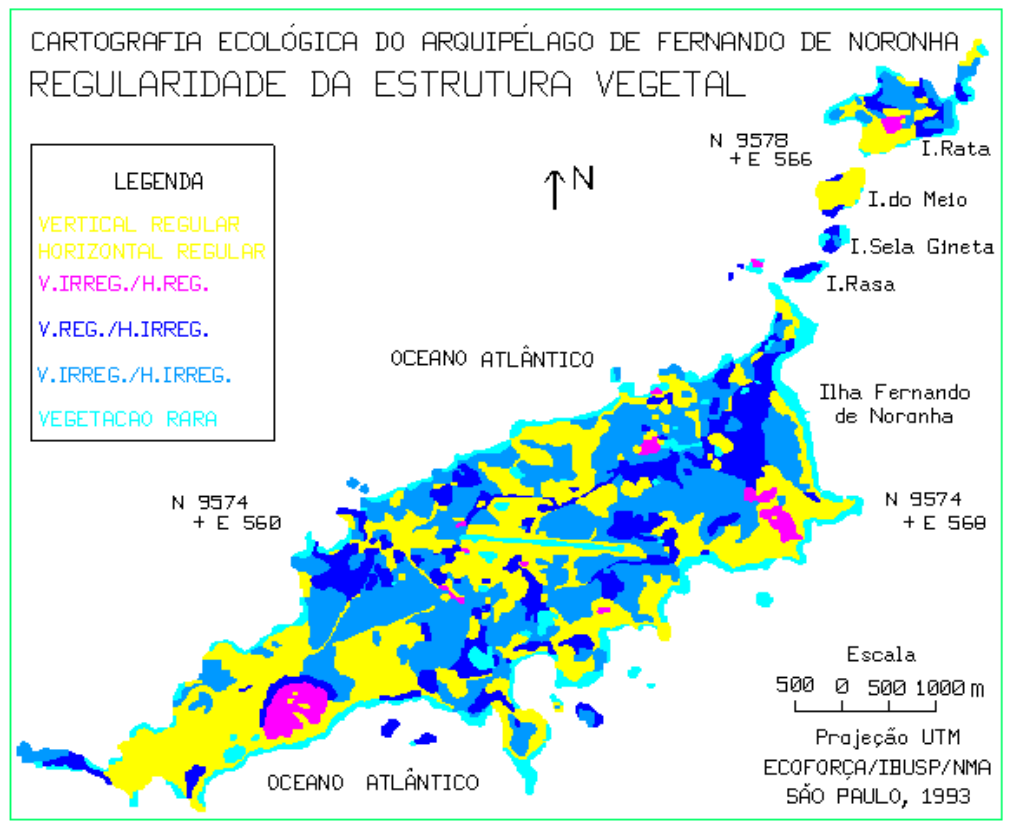


Figura 6.11 - Carta de Regularidade da Estrutura Vegetal de Fernando de Noronha. Fonte: Batistella (1993).

A operação de reclassificação por atributos ilustra um ponto importante do Geoprocessamento: informações cadastrais devem ser armazenadas de forma integrada, com os atributos descritivos guardados num banco de dados tradicional (tipicamente relacional). Com isto, grande quantidade de mapas distintos pode ser gerada a partir da mesma informação básica.

Esta operação mostra ainda que as abordagens metodológicas descritas são antes interdependentes que estanques. No exemplo acima, temos um caso onde o processo de *identificação de áreas* serviu de base para gerar o *mapeamento* da distribuição da regularidade fitofisionômica de Fernando de Noronha.

6.3.3 Zoneamento Ecológico Econômico – Síntese do Meio Físico

Na metodologia para Zoneamento Ecológico-Econômico descrita em Crepani et al. (1996) e Becker e Egler (1996), o uso de imagens de satélite serve como base para definição de unidades de paisagem (chamadas *unidades territoriais básicas*). Uma *unidade territorial básica* (UTB) exprime o conceito geográfico de zonalidade através de atributos ambientais que permitem diferenciá-la de outras unidades vizinhas, ao mesmo tempo em que possui vínculos dinâmicos que a articulam a uma complexa rede integrada por outras unidades territoriais. Estas UTBs são definidas por foto-interpretação em imagens de satélite e servem para a definição dos mapas derivados do meio físico-biótico.

O roteiro metodológico para a geração de uma carta temática de vulnerabilidade natural à erosão, parte do procedimento de caracterização do meio físico nos processos de Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE), conforme metodologia desenvolvida pelo INPE e pelo LAGET/UFRJ (Crepani et al.,1996) e (Becker e Egler,1996) segue os seguintes passos:

1. Elaboração de um mapa preliminar de unidades homogêneas de paisagem obtidas a partir da análise e interpretação visual de LANDSAT/TM, considerando os padrões fotográficos identificados pela variação dos matizes de cores, e pelos elementos texturais de relevo e drenagem.
2. Associação de cada um dos mapas base de Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Cobertura Vegetal a pesos que indicam a contribuição relativa de cada tema, para os processos de morfogênese e pedogênese. A partir de cada mapa temático, serão gerados modelos numéricos de terreno nos quais os valores estarão entre o mínimo de 1 (estabilidade com predomínio da pedogênese) e 3 (instabilidade, com predomínio da morfogênese). Por exemplo, no caso da Geologia, áreas com rochas resistentes à erosão são caracterizadas com valores próximos de 1.
3. Geração de mapas derivados, através de uma operação zonal entre o mapa de unidades territoriais básicas (UTB), obtido na etapa (1) com o modelo numérico de terreno resultante da ponderação de cada mapa temático, obtido na etapa (2). Esta etapa deverá produzir novos modelos numéricos, com a distribuição das contribuições da cada componente do meio físico esteja homogeneizada pela zonalidade das UTBs.

4. Realizar uma operação de média ponderada entre os mapas gerados na etapa (3), o que permitirá integrar a contribuição de cada componente do meio físico para as diferentes UTBs. O dado resultante será um único modelo numérico, com valores entre 1 e 3.
5. Proceder a um fatiamento do modelo resultante, gerando assim uma carta temática de vulnerabilidade natural a erosão.

Para validar a adaptação da metodologia, foi escolhida uma área de trabalho que corresponde à folha Rio Fresco, código SB-22-Y-D e está situada no estado do Pará, perfazendo uma área de 18150 Km² (165km x 110km), e esta localizada entre os paralelos 7° 00' e 8° 00' de latitude sul e os meridianos 51° 00' e 52° 30' de longitude oeste. Os dados utilizados incluem:

- Imagens do satélite TM/LANDSAT -5, bandas 3,4,5, na escala 1:250000. Estas imagens foram utilizadas tanto no formato digital quanto em uma composição colorida (5R4G3B) em papel. Para cobrir toda a área foi necessário fazer um mosaico de duas cenas do satélite (órbita 224, ponto 65, de 24/07/1992 e órbita 225, ponto 65. Data 31/07/1992).
- Quatro cartas temáticas na escala 1:1000000 do Projeto RADAMBRASIL. Volume 4- Folhas SB/SC 22, com o Mapa Geológico, Mapa FitoEcológico, Mapa Geomorfológico e Mapa Exploratório de Solos.
- Carta topográfica na escala 1:250000, confeccionada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE/1982). Projeção UTM/SAD-69, carta Rio Fresco, Folha SB-22-Y-D MIR224.

A Figura 6.12 mostra um mosaico da imagem do sensor TM/LANDSAT em composição colorida 3B4G5R de 24 e 31 de julho de 1992 da área de estudo. A figura 6.13 mostra as unidades territoriais básicas (utbs) obtidas a partir de análise e interpretação da imagem apresentada na Figura 6.12.



Figura 6.12 - Mosaico em composição colorida das bandas 3(B),4(G),5(R) do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT.

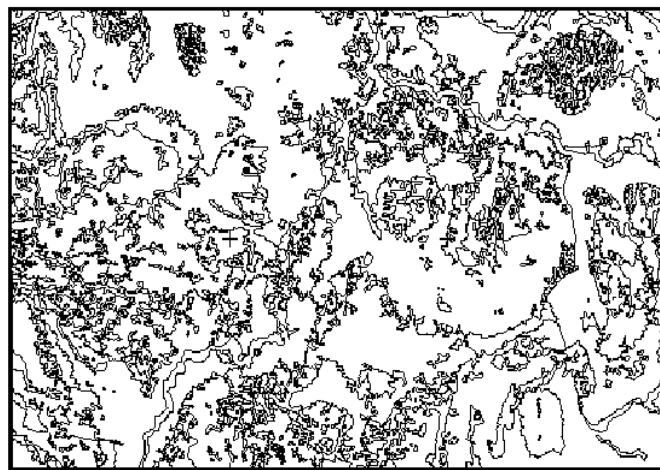


Figura 6.13 - Compartimentação das Unidades Territoriais Básicas da área de estudo

A carta de vulnerabilidade natural à erosão obtida está mostrada na Figura 6.14. A comparação entre os resultados obtidos de forma manual com os produzidos automaticamente mostrou um alto grau de concordância. As diferenças que ocorreram foram ocasionadas por problemas nos mapas básicos originais. Uma análise mais detalhada dos mapas temáticos do RADAM indicou que há divergências relevantes entre os diferentes mapas, especialmente entre os mapas geológicos e os geomorfológicos. Assim, em projetos de integração de dados, é imprescindível realizar um pre-processamento nos mapas temáticos básicos, para corrigir eventuais imprecisões relativas existentes.

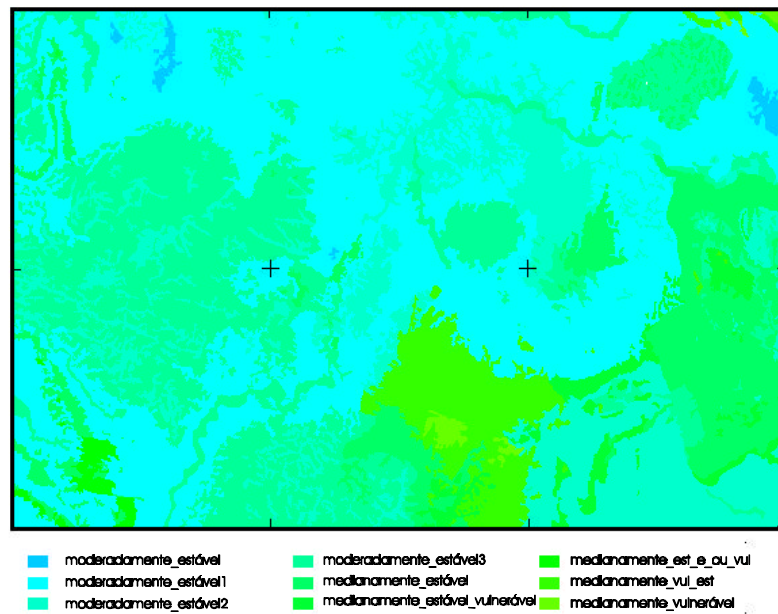


Figura 6.14. Mapa de Vulnerabilidade Natural da Região de Rio Fresco (PA).