

Seleção de bacias para instalação de parcelas permanentes em ecossistema montanhoso

Brenner Stefan Gomes Silva¹
Dalton de Morisson Valeriano¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{brenner, dalton}@ltid.inpe.br

Abstract. Successful ecosystem research, for sustainable management or climate change investigations, is limited by the quality of surveyed data. Basically valid inferences about the whole area should be extended from the site data. The present work describes a methodology to extract, analyze and locate representative basins through previously calculated environmental attributes. The choose of a mountainous region is based on its inherent climatic and biological diversity. Besides that this methodology should be useful for planning long term ecological studies in any ecosystem or to evaluate monitoring sites, or permanent plots, already installed.

Palavras-chave: GIS, long term, mountain, ecosystem, SIG, longo termo, montanha, ecossistema.

1. Introdução

Avaliar a qualidade da base de dados sobre a qual se constrói conhecimento significa dar suporte fundamental a investigações científicas. Este esforço é requisito para aplicação consistente em duas frentes de trabalho: o estudo de resposta de ecossistemas terrestres a mudança climática e o estabelecimento de bases científicas para o uso sustentável de recursos florestais. Ambas requerem o estudo da dinâmica da estrutura da biota (taxonômica, etária e física) e o entendimento do fluxo de energia e da ciclagem biogeoquímica. Para tanto se faz necessário à implantação de sistemas de estudo de longo termo, cujo foco é o monitoramento contínuo de ecossistemas.

No Brasil há esforços iniciais em pesquisa ecológica de longo termo, ou longa duração. Um exemplo é o *Projeto Dinâmica Biológica em Fragmentos Florestais* <pdbff.inpa.gov.br>. Esse projeto enfoca impactos da fragmentação em floresta tropical através do monitoramento de parcelas próximas de Manaus, na Amazônia. No sudeste do Brasil, o programa *Biota* visa representar os biomas mata atlântica e cerrado e o ecossistema costeiro. Acessibilidade e localização de áreas protegidas previamente instaladas foram os únicos critérios utilizados para alocar parcelas permanentes. Acordos institucionais estão em andamento para a sistematização de pesquisas de longo termo cobrindo os demais biomas brasileiros (Seeliger et al., 2000).

A avaliação da qualidade de amostras do ecossistema é um passo básico em pesquisas ecológicas de longo termo. Neldner et al. (1995) comparam métodos, utilizando geoprocessamento, modelagem climática e parâmetros intuitivos, para assegurar qualidade em amostragem da vegetação na Austrália. Da mesma forma, a qualidade de amostragem está relacionada à possibilidade de extrapolar as respostas encontradas em parcelas. No presente estudo foi desenvolvida uma metodologia para seleção de um conjunto otimizado de bacias de drenagem. Isso significa avaliar a representatividade regional da variabilidade ambiental para essas bacias, ou seja, como localizar e distribuir amostras para representar a complexidade de relações do ecossistema. A escolha de uma região montanhosa para o desenvolvimento dessa metodologia se baseia na diversidade biológica e gradientes climáticos inerentes, o que a torna um excelente laboratório para estudos bioclimáticos.

2. Material e Métodos

A presente pesquisa, aplicada ao suporte de estudos de ecossistemas terrestres, desenvolveu uma metodologia com o objetivo de selecionar um conjunto representativo e parcimonioso de bacias de drenagem. Para isso, objetivos específicos foram determinados para produção de dados e análise das bacias. A seqüência de desenvolvimento é dada pelos seguintes passos:

- 1) A produção de campos (*raster*) representando regimes de irradiância, topografia e tipo de cobertura da terra da área de estudo;
- 2) A segmentação da área de estudo em bacias de drenagem (decisão, a priori, de trabalhar com bacias de segunda ordem);
- 3) A atribuição de variáveis derivadas dos três tipos de campos de características ambientais (irradiância, geomorfologia e cobertura da terra). Este passo inclui a seleção de variáveis não redundantes e de um número adequado de bacias para análise;
- 4) A análise de aglomerados, que avalia a estrutura da distribuição das bacias no espaço das variáveis selecionadas;
- 5) O julgamento da análise de aglomerados e decisão por um conjunto de bacias parcimonioso e representativo da área de estudo.

Ferramentas computacionais de domínio público foram priorizadas, como o *Image Processing Workbench* (IPW) v 1.1, para simulação de irradiância (Frew, 1990) em ambiente *Unix*. Os demais programas foram executados em Windows e DOS. Para delimitação de bacias de drenagem utilizou-se o programa Taudem/Mapwindow 2.7. O Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas SPRING v.3.6.03 (Câmara et al., 1996) foi utilizado como ambiente base, para o qual foram transferidos os subprodutos e resultados deste trabalho.

Os programas *S-plus* (Mathsoft, 1999), empregado na análise de aglomerados, o *Microsoft Excell®*, para análise de bacias em planilhas e o programa *Surfer 6*, para krigagem, necessitam de licença paga. Neste caso há alternativas como o SKATER (Lage et al., 2001) para análise de aglomerados, *OpenOffice* para planilhas e o próprio SPRING para krigagem.

2.1. Banco de Dados da Mantiqueira (BDM)

Trata-se de um banco de dados ambiental com informações georreferenciadas em formato digital para a região central da Serra da Mantiqueira. Este banco tem sido desenvolvido com o intuito de dar suporte a estudos ecológicos e subsidiar o diagnóstico e planejamento da gestão ambiental. A aplicação do BDM tende a integração multi-escalar de iniciativas locais de mapeamento e gestão. O limite utilizado na primeira versão do BDM define a área de estudo deste trabalho.

3. Área de Estudo

Situada na Serra da Mantiqueira, a área de estudo possui 5.600 km², sendo delimitada pelos paralelos oeste 45°30' e 44°30' e sul 22°45' e 22°15', como mostra a **Figura 1**. Esta área cobre a tríplice divisa entre São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro e engloba parte do vale do rio Paraíba do Sul, do planalto sul-mineiro e da cadeia de montanhas da serra da Mantiqueira. A proteção do corredor florestal sobre a serra foi estabelecida pelo Decreto (nº 091304/85) que dispõe sobre a implementação da Área de Proteção Ambiental da Serra da Mantiqueira. Outras cinco unidades de conservação estão incluídas: o Parque Estadual de Campos do Jordão, o Parque Nacional do Itatiaia, a Floresta Nacional de Passa Quatro e o Parque Estadual da Serra do Papagaio. Três rodovias (BR458, SP052/MG158 e BR354) cortam a cadeia de montanhas e uma delas, a SP052-MG126, é responsável pelo maior descontínuo florestal desse corredor, conforme Santos (2002).

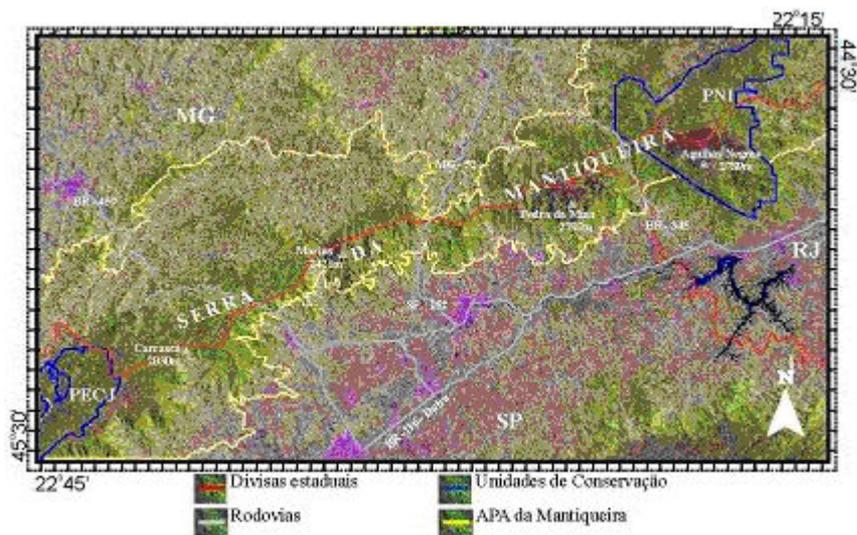


Figura 1 – Localização da área de estudo e alguns limites de referência sobre uma imagem do satélite Landsat/ETM+.

Remanescentes de vegetação nativa cobrem as partes altas da Serra da Mantiqueira. Um corredor ecológico se forma seguindo sua orientação geológica principal SO-NE. A região é dominada por latossolos lixiviados e formações arqueozóicas com a presença de intrusões alcalinas do cretáceo e formação quaternária (Cunha e Guerra, 1998). A topografia é nivelada entre 305 e 2.798 metros acima do nível do mar. Há duas frentes principais de influência climática quando se compara os lados da serra (NO e SE). Na maioria das vezes isto ocorre devido à instabilidade entre massas de ar frias e úmidas provenientes do sul e do leste, enquanto pelo lado continental chegam massas quentes e secas. Condições micro-climáticas extremas direcionam e diversificam fortemente as fisionomias vegetais. Efeitos orográficos são também determinantes e chove entre 1.750 e 2.400 mm nas montanhas. O clima da serra é classificado como de inverno seco e verão quente (Cwa), segundo a atualização de Kottek (2006) para a classificação de Köppen-Geiger.

4. Produção de geo-campos como dados primários

Os chamados geo-campos correspondem às grades numéricas que aqui representaram topografia, regimes de irradiância e cobertura da terra. Estes servem como dados primários, ou seja, dados previamente calculados para o espaço contínuo, sendo posteriormente atribuído às bacias.

4.1. Topografia por Modelo Digital de Elevação

Dois métodos de interpolação foram utilizados para construção do Modelo Digital de Elevação (MDE): o método linear e o método por *krigagem*. As amostras de altimetria foram extraídas das cartas 1:50.000 do IBGE. Por manter as cotas originais, o MDE resultante do método linear serviu para obtenção de estatísticas por bacia. Já o MDE obtido por *krigagem* é empregado no cálculo de irradiância, delimitação de bacias e correção topográfica. Isso porque há suavização do terreno modelado.

A construção do MDE por interpolação linear é feita usando a grade triangular, seguindo a restrição de Delaunay e aplicando a rede de drenagem como linhas de quebra. O MDE interpolado por *krigagem* foi construído com base em amostras locais, cada uma com 690 células em média. Essas amostras representaram regiões concentradas em áreas de relevo irregular da Mantiqueira. A análise geoestatística resultou uma expressão matemática que

indica a tendência espacial das amostras. Após o ajuste de semivariograma, optou-se pelo modelo ajustado do tipo esférico, cujo efeito pepita foi de 0,09 e alcance de 3.200. Estes critérios foram aplicados para interpolação em toda área de estudo, 3435 x 1848 células, com resolução espacial de 30 metros.

4.2. Irradiância global de céu limpo em ondas curtas (IGCLOC)

O regime de irradiância é representado neste trabalho por integrações e amplitudes de diferenças circadianas e estacionais. A irradiância global de céu limpo em ondas curtas (de 0,25 a 4 μm) foi simulada com o uso do algoritmo *toporad* do programa *Image Processing Workbench* (IPW). Este algoritmo implementa o método de dois-fluxos, ou *two-stream* descrito por Meador e Weaver (1980). Como entrada requer-se o modelo digital do terreno, parâmetros atmosféricos e um mapa de albedo. Os procedimentos necessários para simulação da irradiância de ondas curtas sobre a superfície e em condições de céu livre de nuvens foram publicados em Nota Técnica (Silva, 2003a). As grades numéricas de irradiância foram modeladas sobre a área de estudo para as datas de solstício de verão (22/12/2003), solstício de inverno (21/06/2003) e equinócio de outono (23/09/2003) e em 21 momentos destes dias (das 7:00 as 17:00 em intervalos de 30 minutos).

Valores observados pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCD) foram utilizados para comparação e validação dos resultados da simulação. Como as PCD estão situadas em diferentes altitudes para a área de estudo, foi calculado um fator de correção, com base na variação da espessura óptica da atmosfera. O ajuste sobre os valores médios da diferença entre a irradiância simulada e observada resulta em equações de potência negativa, para cada intervalo de tempo, tal como apresentado na **Figura 2**. Um fator de correção a ser subtraído dos valores modelados foi então calculado tendo como base a altimetria do MDE interpolado linearmente. Os valores simulados de irradiância foram integrados e subtraídos do fator de correção para cada dia e em MJ/m^2 . Da mesma forma foram obtidas outras três grades de irradiância para cada dia, que correspondem à manhã, tarde e a diferença destas. A **Figura 2** apresenta ainda uma composição dos resultados obtidos para as três datas modeladas. Neste caso a tonalidade avermelhada é característica das encostas voltadas ao norte, no qual o sol se faz presente durante o inverno.

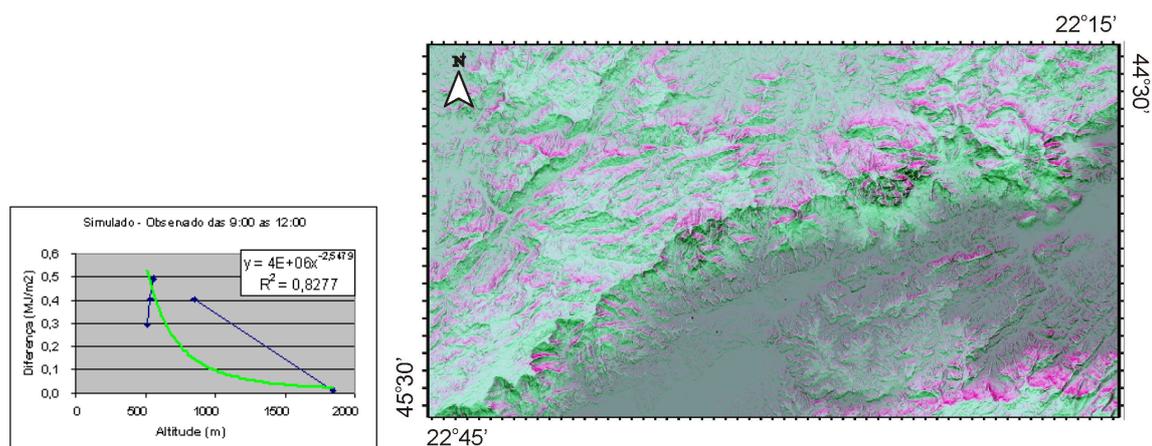


Figura 2 - Fator de correção da irradiância de ondas curtas modelada entre 9:00 e 12:00 e composição das imagens de irradiância integral nos solstícios de inverno (vermelho), verão (verde) e equinócio (azul).

4.3. Cobertura da Terra

Utilizou-se aqui o plano de informação (PI) temático, representando a cobertura da terra, disponível na primeira versão do BDM. Este PI foi obtido através da classificação não supervisionada utilizando a técnica de segmentação por regiões (ISOSEG), seguido por interpretação visual corretiva (Santos, 2002). As classes de cobertura da terra são resumidas em: Área Urbana, Campos Altitude, Floresta Primária, Floresta Secundária, Pasto/Agricultura e Reflorestamento.

5. Delimitação de bacias

Os procedimentos necessários para a segmentação automática da área de estudo em bacias de drenagem foram publicados em Nota Técnica (Silva, 2003b). Esta tarefa é realizada com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) para identificação drenagem em geo-campos e delimitar as linhas de divisores. Para isso utiliza-se o programa TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), desenvolvido por Tarboton (1989) e instituições cooperadas. O TauDEM contém funções de análise do terreno para tratar dados matriciais e extrair a rede de drenagem (vetorial) e polígonos, cujos limites formam bacias.

A segmentação da área de estudo resultou em um conjunto de 5.368 bacias, incluindo bacias de primeira e segunda ordem. Deste conjunto foram selecionadas apenas as bacias de segunda ordem que contenham a área mínima de um hectare de floresta, cobrindo 60% da área da bacia. De acordo com Lamprecht (1986), considera-se essa a área mínima de amostragem para um inventário florestal. Utilizando-se dos atributos de cobertura da terra, ordem topológica e área da bacia, foi selecionado o conjunto de 605 bacias para a análise de aglomerados.

6. Produção de geo-objetos e cálculo zonal de atributos

Com o uso de *operadores zonais*, valores correspondentes aos geo-campos são recuperados e inseridos como variáveis das bacias. Dessa forma é possível tratar de valores totais, comparativos (subtração) e estatísticas (média e amplitude) dentro dos limites de cada bacia. A **Tabela 1** apresenta as variáveis associadas às bacias de drenagem e formam a planilha que entra na análise de colinearidade. Valores de correlação para as variáveis *floresta primária* (FP), *floresta secundária* (FS), *campo de altitude* (CA), *reflorestamento* (REF) são baixos por representarem aspectos localizados. Estas variáveis são sintetizadas pelo valor de *entropia da vegetação* (EVEG), que quantifica o mosaico presente na bacia pela proporção de área para cada tipo de cobertura. A variável *densidade de drenagem* (DD) apresentou menor valor de correlação. A *altitude média* (ALTM) e a *amplitude de altitude* (ALTAMP) representam a variável altitude. As demais variáveis representam o *regime de irradiância* calculado para a data de dezembro em valor médio (DEZM), amplitude (DEZAMP), média da diferença entre manhã e tarde (DEZMTM) e amplitude dessa diferença (DEZMTAMP). As mesmas variáveis foram calculadas para Setembro e Junho. As variáveis VERINVM e VERINVAMP se referem a média da diferença entre verão e inverno e amplitude dessa diferença. Essas variáveis contínuas foram uniformizadas para o domínio de 0 a 100. Em seguida eliminou-se *outliers*, valores abaixo de 1 e acima de 99, que correspondem a erros.

Para um conjunto de 600 objetos, o valor máximo de correlação aceitável é de 0,148 ao nível de 1% de confiança (Rohlf e Sokal, 1996). Dessa forma foram eliminadas variáveis redundantes, restando as que aparecem na **Tabela 2**. Para garantir a representatividade das variáveis modeladas não foram excluídas ALTM e VERINVAMP. Assim um hiper-espaco de cinco variáveis é montado para a análise de aglomerados.

Tabela 1 - Variáveis associadas às bacias e valores de correlação máxima e mínima.

Variável	AREA	FP	FS	CA	REF	PA	EVEG	DD	ALTAMP	ALTM	DEZAMP	DEZM
Correlação máxima	0.65	0.56	0.31	0.48	0.14	0.6	0.6	0.26	0.65	0.56	0.64	0.37
Correlação mínima	-0.49	-0.9	-0.9	-0.26	-0.14	-0.5	-0.6	-0.49	-0.48	-0.66	-0.76	-0.76
Variável	DEZMT AMP	DEZ MTM	SET AMP	SET M	SETMT AMP	SET MTM	JUN AMP	JUN M	JUNMT AMP	JUN MTM	VERINV AMP	VERINV M
Correlação máxima	0.97	1	0.9	0.97	1	1	0.9	0.97	1	1	0.52	0.52
Correlação mínima	-0.44	-0.18	-0.72	-0.83	-0.47	-0.19	-0.7	-0.95	-0.47	-0.19	-0.7	-0.95

Tabela 2 - Matriz de correlação das variáveis menos correlacionadas e mais representativas.

	EVEG	DD	ALTM	DEZM	VERINVAMP
EVEG	1				
DD	-0,11	1			
ALTM	-0,25	0,02	1		
DEZM	-0,14	0,16	0,03	1	
VERINVAMP	0,02	0,26	0,10	-0,27	1

7. Análise de aglomerados

A análise de aglomerados avalia a estrutura da distribuição das bacias no espaço das variáveis selecionadas. Neste trabalho os métodos de análise de aglomerados hierárquicos *aglomerativo* e *divisivo* foram aplicados aos conjuntos completo e reduzido de variáveis. Em ambos investiga-se a dissimilaridade entre os objetos por meio de seus atributos, ou variáveis. A **Figura 4** apresenta o dendrograma resultante do método hierárquico *divisivo* aplicado sobre o hiper-espaço de cinco variáveis. Utiliza-se um valor de dissimilaridade máximo, ou valor de corte, que corresponde ao eixo vertical do dendrograma para formação de aglomerados. Este valor é inversamente proporcional ao número de aglomerados a ser formado.

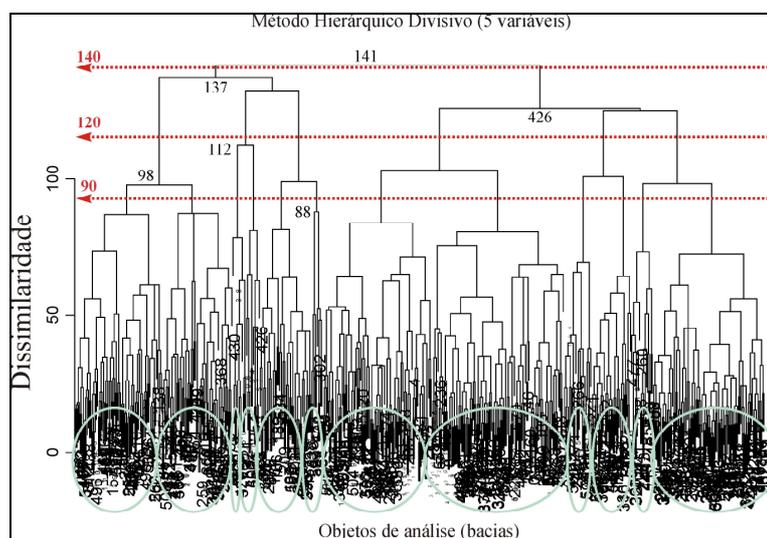


Figura 4 - Dendrograma resultante da análise pelo método divisivo, indicando três valores de corte: 140, 120 e 90 (setas vermelhas) e os aglomerados formados pelo valor 90 (círculos).

8. Seleção do conjunto mais representativo

Para cada aglomerado calculou-se uma condição média no hiper-espaço de variáveis e a distância euclidiana (vetor) de cada bacia até essa média. O menor comprimento do vetor indicou a condição de maior representatividade para cada aglomerado. Assim, dois conjuntos

de bacias foram formados, um resultante da aplicação do método hierárquico *aglomerativo* (AGL_250) e ou outro do método *divisivo* (DIV_90). Diferentes características foram evidenciadas, sendo considerado o conjunto mais representativo aquele de maior abrangência das condições ambiental e geográfica.

8.1. Representatividade ambiental.

Os conjuntos de bacias obtidos pelo método *divisivo* (DIV_090) e *aglomerativo* (AGL_250) recebem avaliação quanto aos valores ocorrentes no espaço de variáveis. O distanciamento entre as ocorrências para cada variável indicou uma maior ou menor representatividade do resultado obtido em cada método. Para isso dividiu-se o intervalo de ocorrência de cada variável em *quartis* e avaliou-se a entropia ($E = \sum pi \cdot \log pi$) para os dois conjuntos de bacias. Valores altos de entropia indicam maior ocorrência sobre os *quartis* e, conseqüentemente maior representatividade no âmbito da variável analisada. Com o uso do método *divisivo* (DIV_090) a soma dos valores de entropia foi de 11,3, enquanto que para o *aglomerativo* (AGL_250) foi de 8,7.

8.2. Representatividade geográfica.

A análise de ocorrência espacial serviu para evidenciar a abrangência ou concentração do conjunto de bacias sobre a área de estudo. Para isso considera-se a posição geográfica das bacias correspondente ao *centroid*, ou *centro de gravidade*. Utilizando as coordenadas X, Y do arquivo de identificadores e o valor médio de altitude (Z), calculou-se a variância para o conjunto de bacias selecionado em cada método. A soma das variâncias de X, Y e Z em DIV_090 foi de $1,09 \times 10^9$ enquanto que para AGL_250 foi de $9,04 \times 10^8$, ou seja, uma ordem de grandeza inferior. Observa-se assim, que utilizando o método *aglomerativo* houve concentração de bacias. Diferentemente o resultado obtido com o método *divisivo* proporcionou amostras mais espalhadas pela região. A **Figura 5** apresenta o conjunto resultante sobre a área de estudo obtido pelos métodos *divisivo* e *aglomerativo*.

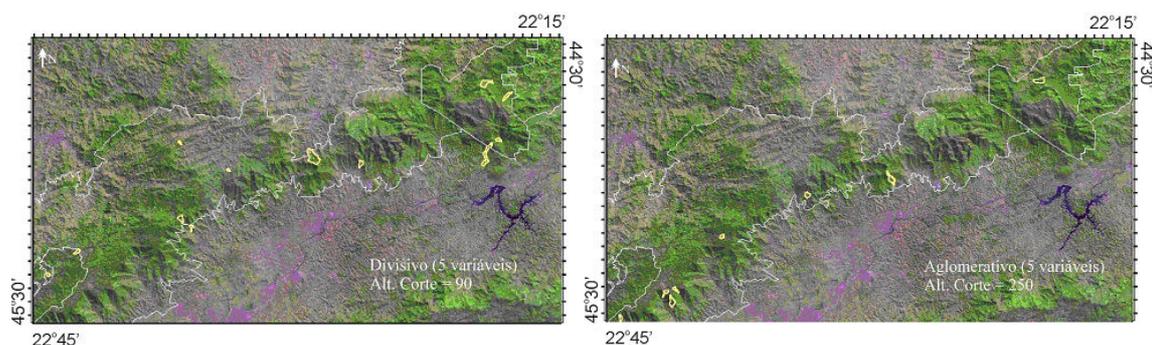


Figura 5 - Distribuição geográfica das bacias (em amarelo) resultantes do processo de seleção usando o método hierárquico *divisivo* (esquerda) e *aglomerativo* (direita).

9. Resultados e Discussão

Entende-se como um conjunto ótimo, aquele que permite eficiência de análise e menos custo para implementação e monitoramento de parcelas permanentes. O método *divisivo* proporcionou maior representatividade em termos de amplitude das variáveis, assim como maior abrangência espacial. A extensão da área de estudo e o espaço interoperacional aqui sugerido é considerada pequena. Isso é enfatizado quando se considera a concentração econômica e de institutos de pesquisa na região. Sendo assim o conjunto de 12 aglomerados

formado pelo valor de corte 90 é considerado aqui ideal para a formação de um sistema regional para estudo de longo termo na Serra da Mantiqueira.

Conclui-se que foi possível desenvolver uma metodologia para a seleção de um conjunto otimizado e representativo de bacias de drenagem que busca suprir os critérios de quantificação e distribuição de amostras. A metodologia proporciona suporte de grande importância para estudos ecológicos de longo termo em um ecossistema montanhoso, assim como para avaliação de parcelas permanentes já instaladas em outras regiões. Esta metodologia envolveu a caracterização de cada bacia com o uso da modelagem ambiental de parâmetros distribuídos, como a irradiância de ondas curtas, cobertura da terra e geomorfologia. Entretanto outros critérios podem ser incluídos. Por exemplo, o estudo do efeito de mudanças climáticas sobre os ecossistemas requer a inclusão do comprimento de linhas de ecótonos. Além desse, são também importantes mapas de solo e vegetação, em escala apropriada, assim como mapas que definem a relação topológica entre rede viária e bacias.

Referências

- Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
- Cunha, S. B.; Guerra, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 388 p.
- Frew, J. **The Image Processing Workbench**. 1990. 382p. Phd. Thesis (Department of Geography) - University of California, Santa Barbara, EUA. 1990.
- Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, 15, 259-263.
- Lage, J.P.; Assunção, R.M.; Reis, E.A. A Minimal Spanning Tree Algorithm Applied to Spatial Cluster Analysis. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, v. 177, 2001.
- Lamprecht, H.; **Waldbau in den Tropen**. Hamburg, Alemanha: Verlag Paul Parey, 1986. 318 p.
- Mathsoft. **S-PLUS 2000 Professional Edition**. Seattle: Mathsoft, 1999.
- Meador, W. E.; Weaver, W. R. Two-stream approximations to radiative transfer in planetary atmospheres: a unified description of existing methods and a new improvement. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 37, p. 630-643, 1980.
- Neldner, V.J.; Crossley, D.C.; Cofinas, M. Using geographic information systems (GIS) to determine the adequacy of sampling in vegetation surveys. **Biological Conservation**, Elsevier, v. 73, p. 1-17, 1995.
- Rohlf, F. J.; Sokal, R. R. **Statistical Tables** - 3rd Edition. New York: Freeman and Company, 1996. 199 p.
- Santos, J. S. M.; **Análise da Paisagem de um corredor ecológico na Serra da Mantiqueira**. 2002. 146p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2002.
- Seeliger, U.; Cordazzo, C.V.; Barbosa, F. **Os Sites e o programa Brasileiro de pesquisas ecológicas de longa duração**. Belo Horizonte: 2002. v. 1. 184 p.
- Silva, B. S. G.; **Modelagem de irradiância solar usando o conjunto de ferramentas Image Processing Workbench (IPW)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2003a. (INPE-10436-NTC/361).
- Silva, B. S. G.; **Delimitação automática de bacias usando o programa TauDEM/Mapwindow**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003b. (INPE-10435-NTC/360).
- Tarboton, D. **The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data**. 1989. Sc.D. Thesis (Department of Civil Engineering) -MIT Cambridge, USA. 1989