



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.16.13.31-TDI

**UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁREAS DE
PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM TOPOS DE
MORROS E MONTANHAS**

Silvia Shizue Leonardi

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelo Drs. Luciano Vieira Dutra, e Camilo Daleles Rennó, aprovada em
06 de outubro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38K8K78>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLISHED BY:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.16.13.31-TDI

**UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁREAS DE
PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM TOPOS DE
MORROS E MONTANHAS**

Silvia Shizue Leonardi

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelo Drs. Luciano Vieira Dutra, e Camilo Daleles Rennó, aprovada em
06 de outubro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38K8K78>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Leonardi, Silvia Shizue.

L553f Uma ferramenta computacional para delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros e montanhas / Silvia Shizue Leonardi. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xxii+46 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.16.13.31-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Luciano Vieira Dutra, e Camilo Daleles Rennó.

1. Área de preservação permanente (APP) . 2. Modelo digital de elevação (MDE). 3. Código florestal. I.Título.

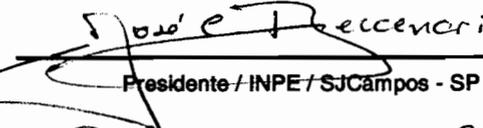
CDU 681.3.6:528.8

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Computação Aplicada

Dr. José Carlos Becceneri



Presidente / INPE / SJCâmpos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



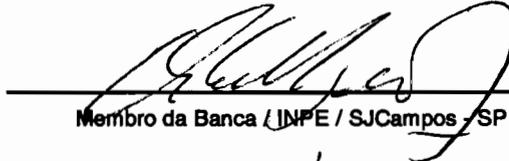
Orientador(a) / INPE / SJCâmpos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



Orientador(a) / INPE / SJCâmpos - SP

Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro



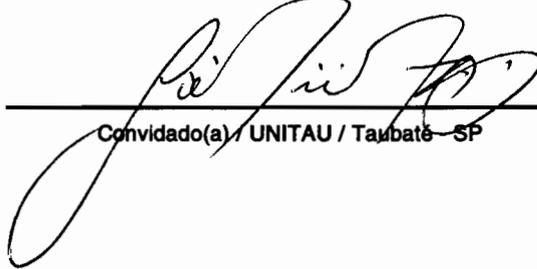
Membro da Banca / INPE / SJCâmpos - SP

Dr. Laércio Massaru Namikawa



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Getúlio Teixeira Batista



Convidado(a) / UNITAU / Taubaté - SP

Aluno (a): Silvia Shizue Leonardi

São José dos Campos, 06 de outubro de 2010

*“Se não houver frutos
Valeu a beleza das flores
Se não houver flores
Valeu a sombra das folhas
Se não houver folhas
Valeu a intenção da semente”*

Chico Ceola

*A meus amados
filhos Ana Luiza e Lucas
e esposo Luiz.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu forças para chegar até aqui.

A minha mãe que em tudo na minha vida me apoiou.

Agradeço aos meus orientadores Dr. Luciano Dutra e em especial ao Dr. Camilo Daleles Rennó pelas incontáveis vezes que me recebeu e se prontificou para discutir os pontos de dúvidas deste trabalho.

Aos meus amigos do DPI, em especial a Jussara Ortiz, Sergio Rosim, Laércio Namikawa e João Ricardo, pelas sugestões, incentivo e encorajamento.

Ao Doutor Getúlio Teixeira Batista pelos dados cedidos para o desenvolvimento desta metodologia.

Ao Senhor Romeu Simi Junior, Assistente Técnico de Gabinete do Ministério Público do Estado de São Paulo, pelo apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao INPE, nas pessoas do Dr. Julio D'Alge e Dr. Gilberto Câmara, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional proporcionado pela execução deste trabalho de mestrado.

RESUMO

O Código Florestal instituído pela Lei 4.771 de 15 de setembro de 1965 e seus ajustes promovidos ao longo destes últimos 45 anos constitui uma base sólida na preservação dos recursos naturais brasileiros. Neste código, cujo objetivo é o de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora e proteger o solo, encontra-se definidas e regulamentadas as Áreas de Preservação Permanente. Embora seja reconhecido no meio acadêmico pelo seu conteúdo, o Código Florestal ainda é pouco aplicado e respeitado, em função do desconhecimento dos proprietários rurais, da dificuldade técnica e do alto custo de seu mapeamento e da ausência de uma política voltada para sua implementação e gestão. Neste trabalho, desenvolveu-se um algoritmo com o objetivo de automatizar a geração de mapas de APP em topos de morros e montanhas. A avaliação dos resultados, utilizando o método Kappa, mostrou alto índice de aderência (96%) àqueles gerados manualmente para relevos caracterizados por ausência de linha de cumeada e de 67% para àqueles com linhas de cumeadas. O algoritmo foi implementado no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas podendo ser utilizado como base para geração de APP em topos de morros e montanhas, reduzindo significativamente os esforços de edição. Dessa forma, atingiu-se o resultado esperado, através da consolidação de um primeiro passo na automatização total deste procedimento, contribuindo assim com a disponibilidade de uma ferramenta aplicável.

A COMPUTATIONAL TOOL FOR AUTOMATIC DELINEATION OF PERMANENT PRESERVATION AREAS ON TOPS OF HILLS AND MOUNTAINS

ABSTRACT

The Brazilian Forest Code was established by Law № 4771, published in September 15, 1965 and has incorporated a number of adjustments over the last 44 years. It provides a solid basis for the preservation of Brazil's natural resources. This code, whose goal is to preserve water resources, landscape, geological stability, biodiversity, gene flow of wild fauna and flora and to protect the soil, defines and regulates the Permanent Preservation Areas. Although it is recognized in academia, the Brazilian Forest Code is still poorly implemented and respected due to the ignorance of landowners, the technical difficulty and high cost of their mapping and the absence of a specific government policy towards its implementation and management. In this work, a procedure is developed to automate the generation of maps of PPA restricted to the top of hills and mountains. The evaluation of the results using the Kappa method showed a high adherence rate (96%) to those generated manually for relief characterized by the absence of ridgeline and 67% for those with ridges. The algorithm was implemented in Georeferenced Information Processing System and can be used as a basis for the generation of PPA at the tops of hills and mountains, significantly reducing the effort of editing. Consequently, the goals of the project were achieved. Through the success of this first step towards full automation this project contributes with a useful tool to this domain.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 2.1 - Duas abordagens para determinação de direção de fluxo: (a) Algoritmo de fluxo unidirecional e (b) algoritmo de fluxo múltiplo | 9 |
| Figura 2.2 - Esquema ilustrativo do algoritmo RHO8: a) MDT hipotético de uma região plana, b) Direções de fluxos possíveis, c) Direção de fluxo resultante | 10 |
| Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia para geração de APP em topos de morros. Em destaque o algoritmo proposto. | 13 |
| Figura 3.2 - Etapas para a delimitação automática de APP em topos de morros e montanhas | 15 |
| Figura 3.3 - Esquema ilustrativo de um ponto pico de uma elevação. | 16 |
| Figura 3.4 - Ilustração simplificada das direções de fluxo possíveis de uma elevação..... | 17 |
| Figura 3.5 – Processo de cálculo de fluxos de multicaminhos adotado neste trabalho: (a) Início da busca; (b) Nível de busca 1; (c) Busca dos vizinhos ao nível 1; (d) Nível 2; (e) Busca dos vizinhos ao nível 2; (f) Nível 3 | 18 |
| Figura 3.6 - Direções de Fluxo: Pico - célula em vermelho; Direções de fluxo resultantes - azul..... | 19 |
| Figura 3.7 - Esquema ilustrativo dos elementos necessário na definição de uma elevação..... | 20 |
| Figura 3.8 - Ilustração da classificação de APP | 21 |
| Figura 3.9 - Agrupamento de morros/montanhas..... | 22 |
| Figura 3.10 - Variância em função do numero de pontos amostrais | 23 |
| Figura 4.1- Áreas de estudo – recortes dos municípios de: a) São José dos Campos, b) Taubaté e c) Paraibuna. | 25 |
| Figura 4.2 - Mapas de APP nos topos de morros das áreas (em destaque às áreas de omissão): a) São José dos Campos, b) Taubaté e c) Paraibuna | 27 |
| Figura 4.3 - Distribuição dos valores estimados Kappa – Primeira Etapa..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 - Mapas de APP nos topos de morros e montanhas considerando o agrupamento de morros com topos com proximidade inferior a 500 metros (com destaque às áreas de inclusão): a) São José dos Campos, b) Taubaté e c) Paraibuna. | 29 |
| Figura 4.5 - Distribuição dos valores estimados Kappa – Segunda Etapa..... | 31 |
| Figura 4.6 - Delimitação do terço superior utilizando as isolinhas (em destaque a elevação que se deseja mapear) | 32 |
| Figura 4.7 - (a) Terço Superior – delimitação utilizando as isolinhas (b) Terço Superior–delimitação por classificação de cotas | 32 |
| Figura 4.8 – Diagrama de heranças da classe DemNet..... | 33 |
| Figura 4.9 - Interface do Sistema | 34 |
| Figura 4.10 - Tempo de execução em função do número de picos encontrados em diferentes tamanhos de MDT | 35 |
| Figura A. 1- Esquema ilustrativo dos elementos necessário na definição de uma elevação..... | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|--------------------|
| Tabela 4.1 - Tempo de execução da ferramenta proposta para diferentes conjuntos de dados | 35 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| APP | Área de Preservação Permanente |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDT | Modelo Digital do Terreno |
| MDS | Modelo Digital de Superfície |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| SPRING | Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| ESRI | Environmental Systems Research Institute |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo do Trabalho..... | 4 |
| 1.2 Organização da Dissertação..... | 4 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 5 |
| 2.1 O Geoprocessamento aplicado ao mapeamento das APP..... | 5 |
| 2.2 Algoritmos para a determinação de direções de fluxo com base no MDT .. | 8 |
| 2.2.1 Algoritmos de direções de fluxo unidirecional | 9 |
| 2.2.2 Algoritmos de direções de fluxo múltiplo..... | 10 |
| 3 METODOLOGIA | 13 |
| 3.1 Modelo Digital de Terreno – MDT..... | 14 |
| 3.2 Rede Hidrográfica..... | 14 |
| 3.3 Delimitação automática de APP em topos de morro | 15 |
| 3.3.1 Definição dos pontos de máximo do MDT | 16 |
| 3.3.2 Algoritmo de direção de fluxo múltiplo para a determinação das bases de morro ou montanha (<i>multicaminhos</i>)..... | 17 |
| 3.3.3 Definição da cota de base..... | 19 |
| 3.3.4 Cálculo e classificação das elevações | 19 |
| 3.3.5 Classificação das cotas de APP | 21 |
| 3.3.6 Agrupamento das elevações..... | 21 |
| 3.4 Processo de avaliação dos resultados..... | 22 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 24 |
| 4.1 Geração de APP em topos de morros e montanhas isoladamente | 26 |
| 4.2 Geração de APP em topos de morros considerando o parâmetro de proximidade inferior a 500 metros..... | 28 |
| 4.3 Avaliação dos resultados e discussão | 31 |
| 4.4 Modelo Computacional e implementação do algoritmo | 33 |

| | |
|--|----|
| 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 37 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 38 |
| APENDICE A - Legislação Ambiental para as APP | 41 |
| APENDICE B - Resolução CONAMA 303/02 - Art. 2º e Art. 3º | 45 |
| B.1 DEFINIÇÕES | 45 |
| B.2 PARÂMETROS..... | 45 |

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais essenciais à vida humana têm sido explorados de forma desordenada no Brasil, colocando em risco sua capacidade de recuperação de modo a atender de forma sustentável à sua crescente demanda. O uso racional dos recursos naturais e a preservação ambiental são dependentes das regulamentações legais, bem como da gestão eficiente por parte do Estado para se fazer cumprir as leis ambientais.

O Brasil possui uma legislação ambiental reconhecidamente avançada, embora haja necessidade de aprimoramento constante no sentido de incorporar novos conhecimentos e ajustar-se na busca de maior eficiência. Por outro lado, a gestão ambiental por parte do Estado tem deixado a desejar e muito ainda há que ser desenvolvido para o alcance de um patamar mínimo de sensibilização e aderência da população no cumprimento das leis.

O Código Florestal de 1965 (Brasil,1965) foi o primeiro grande marco na construção da regulamentação da proteção das florestas brasileiras e, conseqüentemente, dos recursos ambientais associados à floresta, como a água, o solo, a flora e a fauna. Mais recentemente, a resolução do CONAMA 303, de 20 de março de 2002 (Brasil, 2002), representou um grande avanço na consolidação da legislação ambiental no que se refere às **áreas de preservação permanente** (APP), pelo fato de detalhar definições e parâmetros, facilitando o seu entendimento e aplicação.

APP são aquelas áreas definidas em Lei e que se encontram próximas aos rios, lagoas, nascente, encostas e topos de morro com a função ambiental de proteger os recursos hídricos, a biodiversidade e a proteção do solo (Brasil, 1965).

Embora a legislação ambiental que trata das APP tenha representado um avanço na proteção de nossos recursos naturais e ambientais, dois problemas

têm limitado sua aplicação. O primeiro trata-se da pouca disponibilidade de dados cartográficos com precisão adequada que permitam a determinação das APP e o segundo trata-se da pouca disponibilidade de ferramentas computacionais que permitam a geração dos mapas de APP de forma automatizada.

Embora ainda represente um grande desafio, o problema da disponibilidade de cartografia adequada tem sido contornado com o uso de dados de sensoriamento remoto orbital. O aumento no número de satélites comerciais de alta resolução em operação tem ampliado significativamente a oferta de imagens que permitem a obtenção de dados cartográficos atualizados e precisos, tornando seu uso economicamente viável.

Quanto à disponibilidade e ao uso de ferramentas computacionais na geração de mapas de APP verifica-se que o geoprocessamento vem sendo largamente utilizado, porém há uma carência de aplicativos que possam facilitar e otimizar este processo. Tem havido iniciativas no sentido de implementação de funcionalidades específicas para a geração de APP em topo de Morro, que, a despeito dos avanços, ainda não alcançaram performance adequada quanto à produtividade e qualidade da informação gerada.

Atualmente, o levantamento de APP para fins legais tem sido realizado prioritariamente através de levantamentos topográficos de campo, ou ainda, através de processo manual utilizando-se de cartografia na escala 1:10.000, quando disponível para a área de interesse. Este processo apresenta-se de difícil execução e de alto custo para os interessados, que são os proprietários rurais e os órgãos ambientais responsáveis pela aplicação da lei.

O aspecto mais crítico na automatização do processo de geração das APP refere-se às áreas de topo de morro e montanha, pois os critérios e parâmetros que caracterizam estas áreas são de difícil aplicação, visto a necessidade de interpretação geográfica. Destacam-se ainda, entre as dificuldades, algumas

controvérsias quanto à interpretação das definições e dos parâmetros constantes da Resolução CONAMA 303/02, que é utilizada como referência para geração das APP.

Considerando as dimensões do território brasileiro, o desafio para a aplicação da lei das APP somente poderá ser superado através do desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitam a automatização deste processo. Alguns trabalhos evidenciam que as APP representam, em média, mais de 20% (Barbosa, 2003; Cota, 2009) das propriedades rurais, embora esta percentagem varie de lugar para lugar. Projetando este percentual para o território brasileiro temos uma área de mais de 1,7 milhões de Km² de APP para mapear e monitorar.

Encontra-se na literatura algumas iniciativas neste sentido, como os trabalhos desenvolvidos por Ribeiro et al. (2002) e Hott et al. (2005), que, utilizando-se dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e do sistema ArcGIS (ESRI, 2006), desenvolveram procedimentos para mapeamento de APP através de processos automatizados. Os resultados foram pouco satisfatórios do ponto de vista da aplicação prática, não permitindo seu uso para fins de aplicação da lei.

Pode-se citar, como uma das primeiras iniciativas na tentativa de automatizar e facilitar a geração de APP de topo de morro e montanha, a implementação de uma funcionalidade no sistema de geoprocessamento SPRING (Câmara et al., 1996), que possibilita de modo semi-automático a geração dessas áreas. Ainda que tenha representado um grande apoio na determinação de APP em topo de morro, os resultados nem sempre são consistentes, pois a dependência de interpretação do operador quanto à determinação da base do morro ou montanha pode gerar resultados distintos para uma mesma área.

O objetivo deste trabalho foi definido com base na relevância do assunto em questão e visou o desenvolvimento de um algoritmo que tornasse a tarefa dos

usuários em geoprocessamento mais fácil quanto ao mapeamento de APP em topos de morros e montanhas. Partiu-se de uma nova abordagem metodológica no desenvolvimento do algoritmo que busca contornar os problemas apresentados nos aplicativos atualmente implementados.

1.1 Objetivo do Trabalho

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, utilizando o conceito de direções de fluxo em modelos hidrológicos, capaz de delimitar automaticamente as áreas de preservação permanentes em morros e montanhas, tendo como produto final um mapa temático em conformidade aos requisitos legais.

1.2 Organização da Dissertação

Este documento está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica relativa aos conceitos e princípios das ferramentas e algoritmos necessários a um entendimento contextualizado dos propósitos deste trabalho.
- A metodologia utilizada no desenvolvimento da ferramenta para a delimitação automatizada de APP em topos de morros e montanhas é apresentada no Capítulo 3, onde todas as etapas são descritas, bem como o processo adotado para avaliação dos resultados.
- No Capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais e sua avaliação. Este capítulo apresenta ainda o diagrama de classe e a interface do sistema desenvolvido.
- Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando a importância dos conceitos relativos ao geoprocessamento para este trabalho, bem como dos esforços já empreendidos na busca da implementação de aplicativos que venham facilitar o mapeamento de APP, procedeu-se a uma conceituação e revisão bibliográfica sobre o assunto, apresentado no item 2.1. Considerando ainda que o desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho está fundamentado na concepção de um algoritmo de direção de fluxo hídrico, baseado em um modelo digital do terreno (MDT), encontra-se descrito no item 2.2, uma revisão sobre os algoritmos para a determinação de direções de fluxo. No apêndice A, encontra-se uma revisão e discussão sobre a legislação ambiental aplicada às APP, cuja leitura é sugerida para aqueles não habituados ao assunto.

2.1 O Geoprocessamento aplicado ao mapeamento das APP

O geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de ferramentas computacionais que permitem a manipulação de dados e informações espaciais, permitindo a geração de análises geográficas. Tem sido largamente aplicado na geração de mapas de APP, ainda que os aplicativos desenvolvidos para a geração das APP sejam restritos a alguns parâmetros e auxiliem parcialmente neste processo.

Inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de mapear APP utilizando-se o geoprocessamento, entre os quais pode-se citar Barbosa (2003), Nascimento (2005), Catelani e Batista (2007) e Reis et al. (2008). Porém, estes trabalhos possuem pequena abrangência territorial e foram desenvolvidos utilizando processos semi-automáticos e muitas vezes manuais na sua elaboração, não tendo como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para automatização do processo. Na sua grande maioria, os trabalhos foram desenvolvidos utilizando-se de cartografia em escala 1:50.000 ou menor, bem como utilizando imagens de satélite com resolução espacial de

30 metros para mapeamento do uso do solo, o que torna seu resultado inadequado à aplicação da lei, visto a pouca precisão destes dados (Hott et al., 2004; Cota e Moura, 2008).

Iniciativas no sentido de desenvolver metodologias e ferramentas automatizadas para a geração de APP em topo de morro e montanha teve início com os trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal de Viçosa, por Ribeiro et al. (2002). Este autor desenvolveu um método para determinação automática de APP em topos de morros para a bacia hidrográfica do córrego do Paraíso, no estado de Minas Gerais, para o qual utilizou dados altimétricos em escala 1:10.000. A metodologia baseou-se no conceito do Modelo Digital de Elevação - MDE hidrologicamente consistente, a partir do qual foram identificados os picos de morros e linha de cumeada, bem como a rede hidrográfica. MDE hidrologicamente consistente consiste no relevo modificado para que os fluxos, dentro de uma bacia hidrográfica tenham continuidade, pois os mínimos locais são extraídos. Conseqüentemente, esse relevo pode distorcer localmente a sua representação original.

Hott et al. (2004) aplicou os conceitos de MDE hidrologicamente consistente para desenvolver processo automatizado de cálculo de APP em topos de morros, para o qual utilizou dados SRTM do Estado de São Paulo e dados topográficos IBGE, escala 1:50.000, do município de Campinas. O autor estabeleceu como critério para definição da base de morro a “cota da depressão mais baixa ao seu redor”, determinada pela rede hidrográfica gerada a partir do MDT e pelo algoritmo de determinação do fluxo superficial implementado no ArcGIS 9.0 (ESRI, 2008). Embora tenham sido julgados satisfatórios, a comparação dos resultados obtidos a partir dos dados SRTM e IBGE, para o município de Campinas evidenciou a grande influência da escala dos dados cartográficos nos resultados e a conclusão que os mesmos somente poderiam ser utilizados como base para um macro-planejamento. Outro aspecto ressaltado neste trabalho é a necessidade da definição de uma escala de mapeamento aceitável para fins de aplicação da lei, por parte do CONAMA.

Considerando a importância do componente altimetria para este trabalho e considerando a confusão ainda existente entre os diversos termos que a caracterizam, descrevem-se as definições dos termos Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital de Terreno (MDT), e Modelo Digital de Superfície (MDS). Estes termos são utilizados, muitas vezes, como sinônimos, enquanto que, na realidade, eles se referem a produtos diferentes (El-Sheimy et al., 2005).

Neste trabalho, o termo MDE é utilizado genericamente, enquanto que o MDT refere-se à altitude exclusivamente do solo e o termo MDS é utilizado para caracterizar a altitude máxima de uma superfície geográfica, ou seja, inclui a altitude dos objetos que estão sobre o terreno, como construção e vegetação.

A precisão dos dados altimétricos, a qual está associada à escala do mapeamento, é decisiva na qualidade dos resultados e conseqüentemente definirão sua aplicabilidade para fins legais. Cota e Moura (2009) avaliou os dados SRTM comparativamente aos dados IBGE em escala 1:100.000 na geração de declividade, onde observou diferença significativa na quantidade de APP geradas a partir destas duas fontes. Os autores concluíram que ambos são inadequados para a delimitação das APP.

Ainda relativo à precisão dos dados altimétricos, merece atenção o uso sistemático do MDS para execução de mapeamento de APP encontrada na literatura, pois como já esclarecido este dado pode apresentar diferenças significativas com o MDT, o qual é o produto mais adequado para fins de aplicação do Código Florestal.

Pode-se deduzir através da análise da literatura que maiores investimentos no aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos aplicativos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são necessários e imprescindíveis para

viabilizar o mapeamento de APP em larga escala, o que permitiria ampliar a capacidade de gestão destes recursos naturais.

2.2 Algoritmos para a determinação de direções de fluxo com base no MDT

Considerando a importância dos algoritmos de direções de fluxo hídrico, utilizados nos modelos hidrológicos, para o desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho, será apresentada neste item uma revisão sobre os principais aspectos destes algoritmos, com base no MDT, encontrados na literatura.

Um bom desempenho do algoritmo de direções de fluxo torna-se essencial neste trabalho, na medida em que a representação fiel do fluxo hídrico no terreno, definido sobre o MDT, permite a identificação precisa dos pontos de cota mínima no entorno de um morro ou montanha.

Os algoritmos de direções de fluxos hídricos, encontrados na literatura, são a base sobre o qual são desenvolvidos os modelos hidrológicos distribuídos, que se constituem em ferramentas essenciais no desenvolvimento de outros aplicativos, entre os quais se destaca os modelos de erosão, previsão de deslizamento de terra e de captação e análise de rede de drenagem (Quinn et al., 1991; Tribe, 1992).

Encontram-se na literatura duas abordagens distintas na elaboração destes algoritmos, conforme ilustrado na Figura 2.1. A primeira é caracterizada como algoritmos de direção de fluxo único, também conhecido como modelo de fluxo unidirecional e a segunda abordagem é caracterizada por algoritmos de direções de fluxo múltiplo.

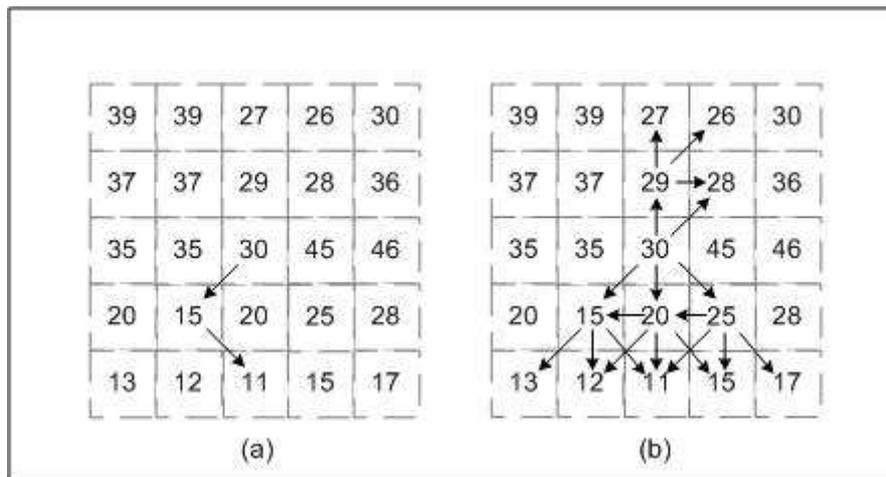


Figura 2.1 - Duas abordagens para determinação de direção de fluxo: (a) Algoritmo de fluxo unidirecional e (b) algoritmo de fluxo múltiplo

2.2.1 Algoritmos de direções de fluxo unidirecional

Segundo Mark (1984), algoritmos de fluxo unidirecional são aqueles onde o montante total do fluxo deve ser recebido pela célula vizinha única que tem o máximo gradiente negativo em relação à célula atual. Diversos algoritmos de fluxo unidirecional podem ser encontrados na literatura, entre os quais se destacam o D8 (O'Callaghan e Mark 1984) e Rho8 (Fairfield e Leymarie, 1991), descritos a seguir.

2.2.1.1. Algoritmo Determinístico “Eight-Node” - D8

O algoritmo básico D8 (O'Callaghan e Mark 1984) é provavelmente o algoritmo mais popular de determinação de fluxo. Neste algoritmo, o gradiente entre o ponto central e os seus vizinhos, numa janela 3x3 do MDT, é calculado e a direção de fluxo do ponto central é definida para o ponto vizinho de maior gradiente, passando este a ser o novo ponto central.

Apesar de ser um algoritmo simples e tradicional, uma das maiores desvantagens do D8 é a discretização do fluxo, pois embora o ponto central possa receber fluxo ascendente de diversas fontes, o fluxo descendente

somente pode ir para uma direção. Assim, o algoritmo não é adequado para linhas de crista e encostas convexas (Zhou e Liu, 2002).

2.2.1.2. Rho8

Fairfield e Leymarie (1991) propuseram uma função estocástica que aplicada ao D8 determina aleatoriamente a direção do fluxo, principalmente em situações onde a área é plana (Figura 2.2). Por esse motivo, esse algoritmo é conhecido como D8 estocástico, que visa evitar as direções de fluxo paralelo, consequentes do algoritmo D8 determinístico (Zhou e Liu, 2002).

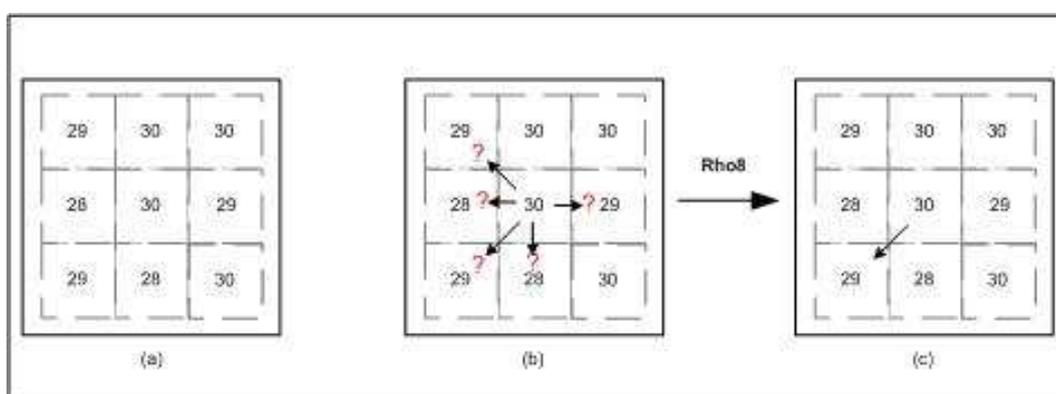


Figura 2.2 - Esquema ilustrativo do algoritmo RHO8: a) MDT hipotético de uma região plana, b) Direções de fluxos possíveis, c) Direção de fluxo resultante

2.2.2 Algoritmos de direções de fluxo múltiplo

Algoritmos de direções de fluxo múltiplo são aqueles onde o fluxo da célula atual deve ser distribuído para todas as células vizinhas de menor cota, segundo uma regra pré-determinada (Quinn et al. 1991). Assim, a direção de fluxo não aponta necessariamente a uma única célula e o fluxo do centro da célula pode distribuir-se para todas ou parte das células vizinhas, em uma janela 3x3 (Zhou e Liu, 2002), conforme Figura 2.1 (b).

Diversos algoritmos de fluxo múltiplo podem ser encontrados na literatura, entre os quais se destacam aqueles baseados na declividade (Quinn et al.

1991) e o FMFD (Freeman Multiple Flow Direction, Freeman, 1991), descritos a seguir.

2.2.2.1. Múltiplas direções de fluxo baseado na declividade

Quinn et al. (1991) propôs uma metodologia, utilizado em modelos hidrológicos para particionar a água (excesso), onde o fluxo do centro da célula pode fluir dentro de todas ou parte das células vizinhas, em função da declividade. A distribuição de fluxo entre as células é proporcional ao produto da distância medida e de um fator de peso, que está relacionado à direção do fluxo na janela 3x3 (Ramos et al., 2003).

$$F_i = \frac{P_i D_i}{\sum_{i=1}^n P_i D_i} \quad (D > 0; n \leq 8) \quad (2.1)$$

onde F_i é o fluxo proporcional a ser distribuído para a *iésima* célula; P_i e D_i os respectivos peso e declividade entre a célula central e a *iésima* célula.

Em uma grade MDT,

$$P_i = \frac{\sqrt{2}}{4} \Delta r \quad (\Delta r = \text{resolução}) \text{ para as direções diagonais} \quad (2.2)$$

e

$$P_i = \frac{1}{2} \Delta r \quad \text{para outras células} \quad (2.3)$$

2.2.2.2. FMFD

Freeman (1991) propôs uma metodologia semelhante à de Quinn et al. (1991), mas não considerou a distância entre as células.

$$F_i = \frac{(D_i)^p}{\sum_{j=1}^n (D_j)^p} \quad (D > 0; n \leq 8) \quad (2.4)$$

Observa-se que o estudo e desenvolvimento dos algoritmos de modelagem hidrológica, assim como os algoritmos de direção de fluxo hídrico, sobre um MDT, constituem-se num universo extenso e complexo da matemática. Maiores informações sobre os algoritmos de direção de fluxo hídrico e análise comparativa de sua precisão podem ser encontradas no estudo desenvolvido por Zhou e Liu (2002).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o método de delimitação automática de topos de morros e montanhas proposto neste trabalho. Para facilitar o entendimento da metodologia, as fases envolvidas neste processo são apresentadas na Figura 3.1.

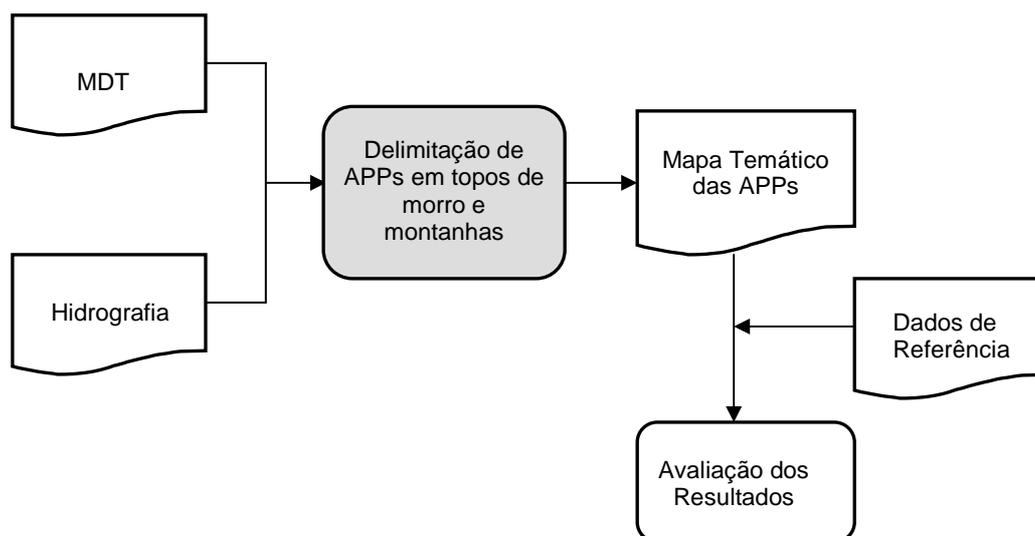


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia para geração de APP em topos de morros. Em destaque o algoritmo proposto.

Para o método proposto, supõe-se a disponibilidade cartográfica planialtimétrica no formato digital. Dois elementos cartográficos são fundamentais no processo de mapeamento de APP em topo de morro e montanha, quais sejam, altimetria (MDT) e rede hidrográfica. A altimetria se justifica pelo fato dela representar o relevo, ou seja, representar a cota “z” do terreno para cada coordenada geográfica, enquanto que a rede hidrográfica tem sua importância na definição da base de morro e montanha. Isto se deve pelo fato do código florestal definir como base o ponto de menor cota altimétrica no entorno do morro ou montanha, que se encontra, na maioria das vezes, materializado no leito do rio próximo ao morro.

Alguns autores (Ribeiro et al., 2002) têm se dedicado ao desenvolvimento de metodologia para a extração da rede de drenagem a partir do MDT. Ainda que

bons resultados tenham sido alcançados, sua utilização não é viável ao propósito de geração de um mapeamento de APP para fins de aplicação da lei, visto a necessidade de maior precisão de posicionamento dos elementos gráficos.

3.1 Modelo Digital de Terreno – MDT

O MDT representa virtualmente o terreno e sobre o mesmo serão aplicados os algoritmos que representam os parâmetros legais de APP estabelecidos pela legislação ambiental. Consequentemente sua precisão é essencial para a geração de um resultado que guarde relação com a realidade, permitindo desse modo sua aplicação prática.

A Resolução CONAMA 303/02 não especifica qual a escala cartográfica ou a precisão dos dados cartográficos a serem utilizados na obtenção de APP em topos de morros e que possam ser aplicados legalmente na prática. Esta omissão nos critérios estabelecidos pela Lei já foi fruto de observação de outros estudos (Hott et al., 2004; Cota e Moura, 2009), que observaram resultados significativamente diferentes de APP em função da precisão dos dados de altimetria.

3.2 Rede Hidrográfica

Assim como para o MDT, a precisão e consequente aplicabilidade dos resultados obtidos na geração de APP são dependentes da qualidade dos dados cartográficos de hidrografia a ser utilizado.

Considerando que o algoritmo desenvolvido tem como preceito o uso da altimetria no formato matricial e, considerando o ganho de desempenho computacional quando se utiliza o mesmo formato dos dados necessários ao objetivo da operação, foi realizada no SPRING a conversão da rede hidrográfica do formato vetorial para o formato matricial.

3.3 Delimitação automática de APP em topos de morro

A metodologia adotada para a delimitação automática de APP em topos de morros e montanhas encontra-se ilustrada na Figura 3.2 e detalhada a seguir. A entrada é composta pelo MDT e pela rede hidrográfica no formato matricial e a saída, por um mapa temático contendo as classes de APP.

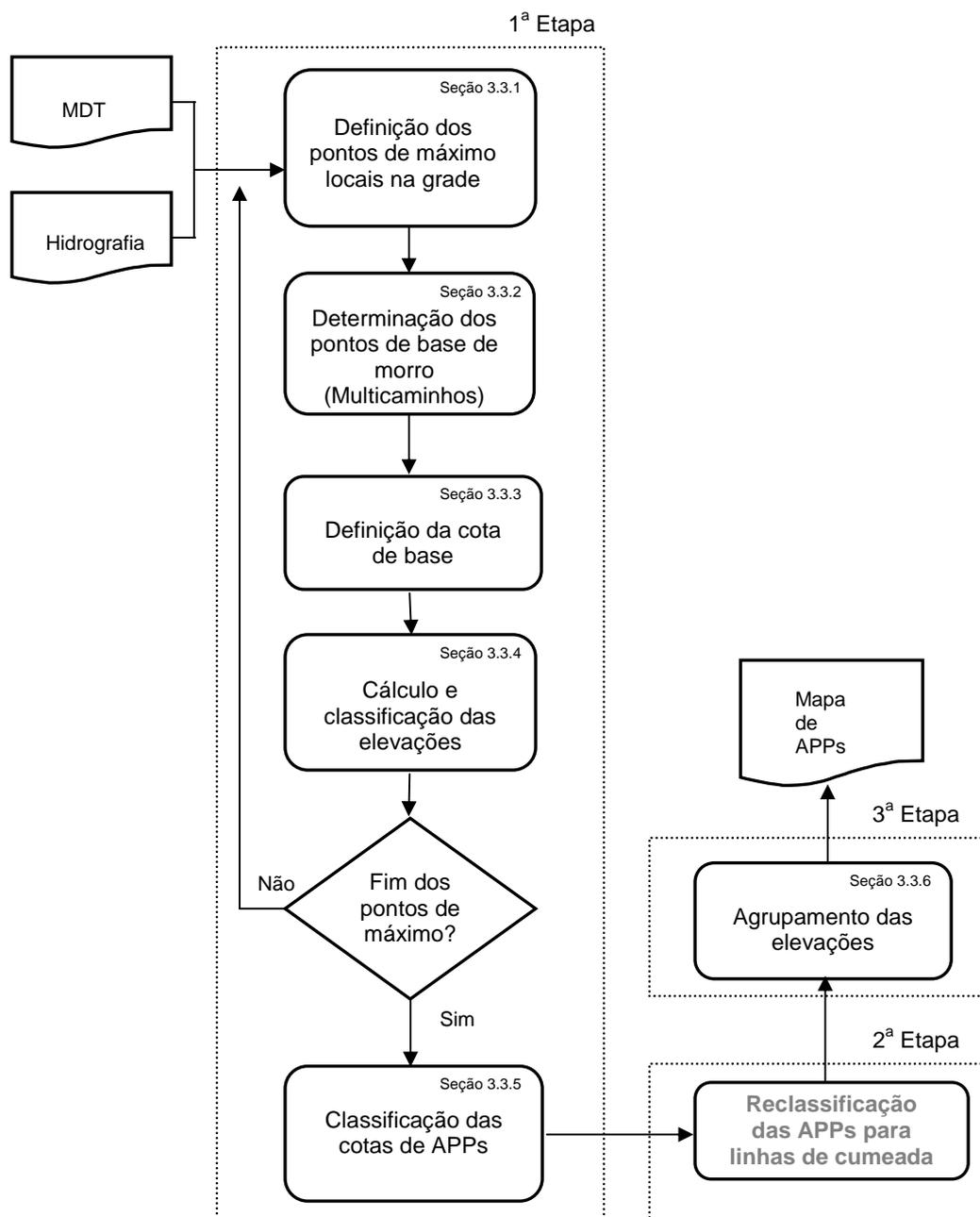


Figura 3.2 - Etapas para a delimitação automática de APP em topos de morros e montanhas

O processo proposto contempla uma sequência de três etapas para abarcar todas as definições e parâmetros legais. A primeira etapa refere-se à geração de APP em topos de morros isoladamente. Em seguida, o cálculo para o elemento linha de cumeada. Por último, o agrupamento de morros com equidistância inferiores a 500 m.

3.3.1 Definição dos pontos de máximo do MDT

Os morros e montanhas são individualizados pelos seus picos (cumes) e suas bases. Os picos são determinados a partir do MDT, como sendo todos os pontos onde sua vizinhança 3x3 possui valores menores (Figura 3.3), ou seja, dado um ponto $P_{i,j}$, a sua vizinhança obedece a seguinte relação:

Valor $N(i,j) \leq$ Valor $P_{i,j}$ para todo $i \neq j$, onde:

$$N_{i,j} = \{ (i-1,j-1), (i-1,j), (i-1,j+1), (i,j-1), (i,j+1), (i+1,j-1), (i+1,j), (i+1,j+1) \} \quad (3.1)$$

A princípio, qualquer ponto de máximo local no MDT é considerado pico, podendo ser descartado no momento da classificação da elevação quando são verificados os parâmetros que as definem (altura e declividade), como sendo morro ou montanha.

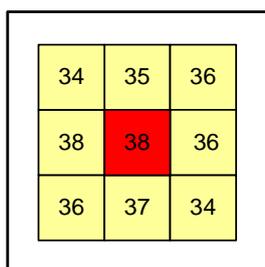


Figura 3.3 - Esquema ilustrativo de um ponto pico de uma elevação.

3.3.2 Algoritmo de direção de fluxo múltiplo para a determinação das bases de morro ou montanha (*multicaminhos*)

O algoritmo de direção de fluxo *multicaminhos*, desenvolvido para a determinação das cotas de base de morros e montanhas, constitui o elemento fundamental da metodologia utilizada neste trabalho. A seguir é apresentado o detalhamento do processo e de sua operação.

O algoritmo aqui desenvolvido, não tem como objetivo calcular a distribuição de fluxo hidrológico, mas sim determinar todas as direções de fluxos possíveis para encontrar, a partir do pico, os pontos de drenagem que circundam aquela elevação (Figura 3.4). Assim como Quinn et al. (1991), Freeman (1991), entre outros, neste algoritmo foram utilizados os conceitos do fluxo unidirecional D8 de O'Callaghan e Mark (1984).

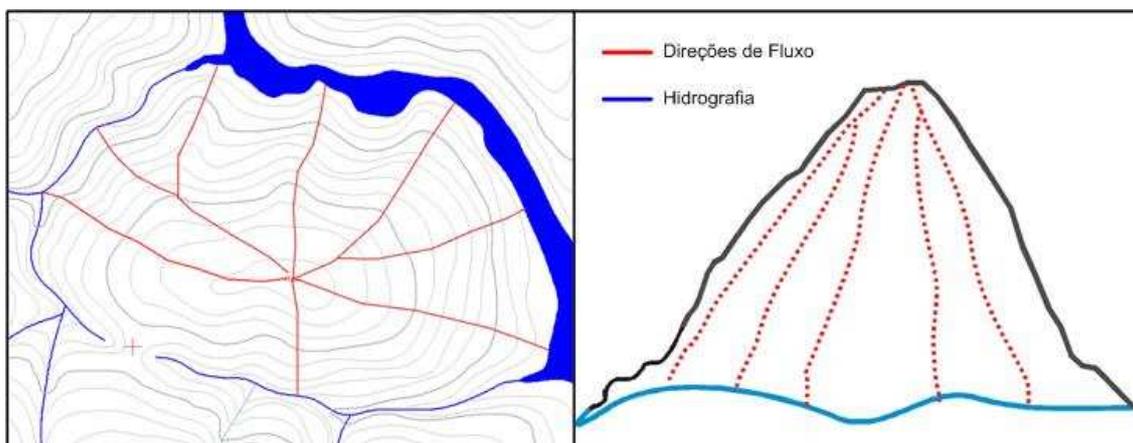


Figura 3.4 - Ilustração simplificada das direções de fluxo possíveis de uma elevação

O cálculo das direções de fluxo *multicaminhos* é estabelecido em função da altitude do terreno e o processo se inicia a partir de um ponto de máximo local do MDT. Conforme ilustrado na Figura 3.5, a partir do valor de máximo local, cada ponto da matriz é conectado a todos ou parte de seus oito vizinhos. Esta busca é feita de forma circular e crescente (em linhas e colunas da grade) partindo-se de um ponto central. Este procedimento é descrito a seguir:

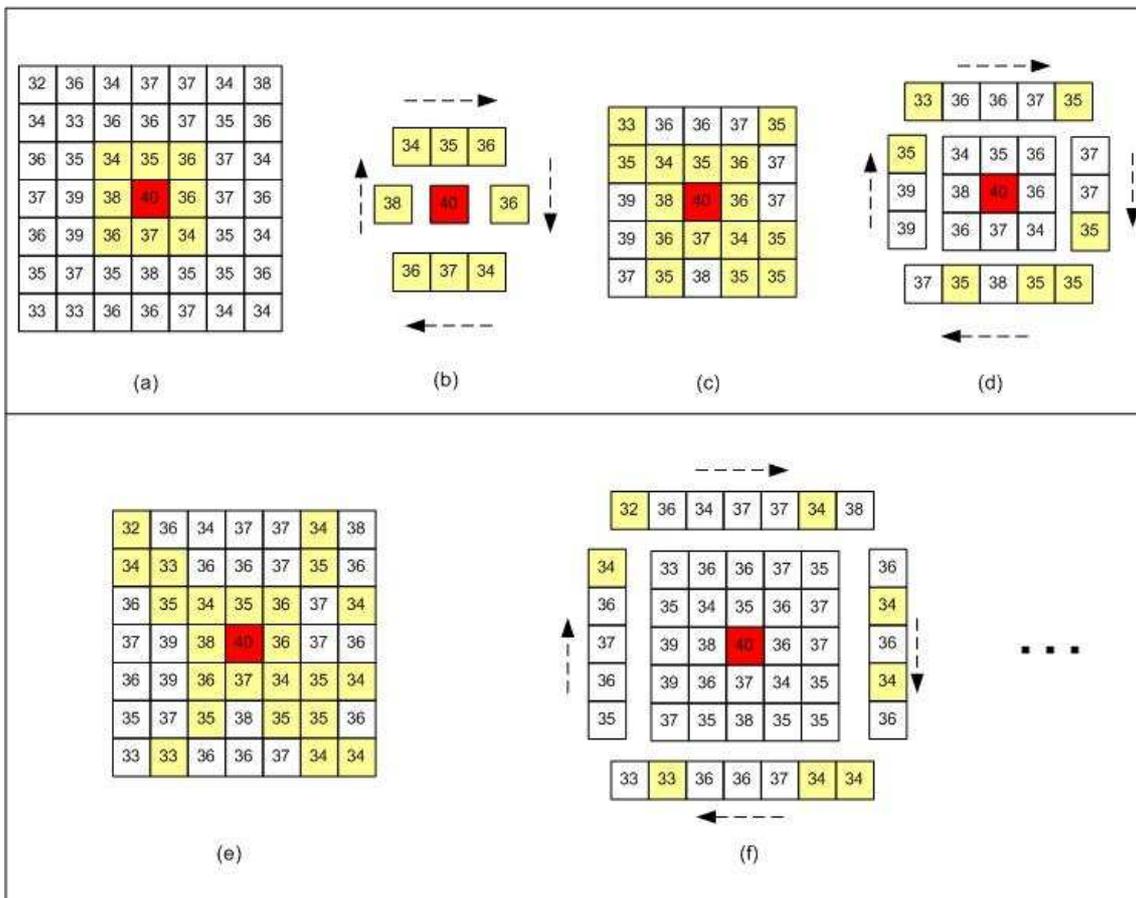


Figura 3.5 – Processo de cálculo de fluxos de multicaminhos adotado neste trabalho: (a) Início da busca; (b) Nível de busca 1; (c) Busca dos vizinhos ao nível 1; (d) Nível 2; (e) Busca dos vizinhos ao nível 2; (f) Nível 3

1. Inicie a busca (nível de busca = 0) a partir de um ponto de máximo local na grade ($MDT_{i,j}$).
2. Marque os 8 vizinhos a $MDT_{i,j}$ como ponto de início de uma nova busca (nível de busca = 1, Figura 3.5 (a)).
3. Nas linhas e colunas do novo nível de busca (Figura 3.5 (b)), para cada ponto marcado, verifique os respectivos 8 pontos vizinhos.
4. Marque todos os pontos vizinhos, cujos valores sejam menores ou iguais ao ponto central (Figura 3.5(c)), como sendo pontos de nova busca.
5. Se algum ponto for de drenagem, guarde o ponto e não o considere como de nova busca.

6. Eleve o nível de busca (Figura 3.5(d)).
7. Volte ao procedimento (3) até não mais existir pontos de busca.

Os resultados das direções de fluxo (caminhos) encontrados para essa grade são apresentados na Figura 3.6.

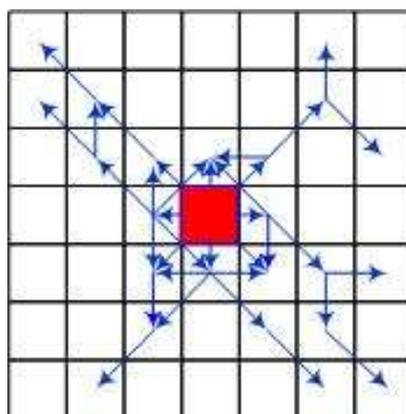


Figura 3.6 - Direções de Fluxo: Pico - célula em vermelho; Direções de fluxo resultantes - azul

3.3.3 Definição da cota de base

A escolha do ponto que será considerado como base do relevo é feita pelo menor valor de cota altimétrica de todos àqueles encontrados ao seu redor, de acordo com os parâmetros e definições estabelecidas na resolução CONAMA 303/02: “base de morro ou montanha: plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor.

3.3.4 Cálculo e classificação das elevações

Conforme ilustrado na Figura 3.7, o cálculo e a classificação das elevações são realizados a partir dos valores de altura (H) e declividade (D). A altura é dada pela diferença algébrica entre o valor do pico e o valor da base:

$$H = P - B \quad (3.5)$$

Cada elevação é analisada durante o processo de geração das bases de topos de morros e montanhas. A partir do ponto de pico até suas bases, cada ponto do relevo tem sua inclinação calculada pelas derivadas parciais, computando-se os valores de altitude em uma janela de 3x3 pontos (Jones,1998).

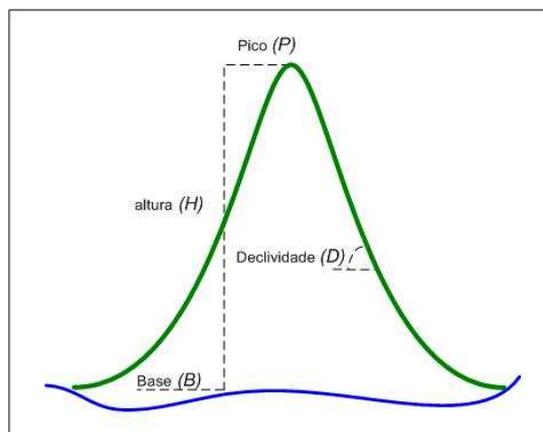


Figura 3.7 - Esquema ilustrativo dos elementos necessário na definição de uma elevação

Considerando a amplitude (H) e declividade (D) de cada elevação, esta somente será considerada para o cálculo da APP:

- a) Se $H > 300$, a elevação é classificada como montanha
- b) Se $50 < H < 300$ e $D > 17^\circ$ ou 30%, a elevação é classificada como morro

As elevações que não satisfizerem estes critérios serão descartadas a partir desta etapa.

Dado que a partir desta etapa temos morros e montanhas classificados, o próximo passo consiste em definir para cada elevação as áreas pertencentes às APP.

3.3.5 Classificação das cotas de APP

São consideradas como APP todas as áreas cujos valores de cota estão entre o valor de pico e o terço superior, conforme ilustrado na Figura 3.8.

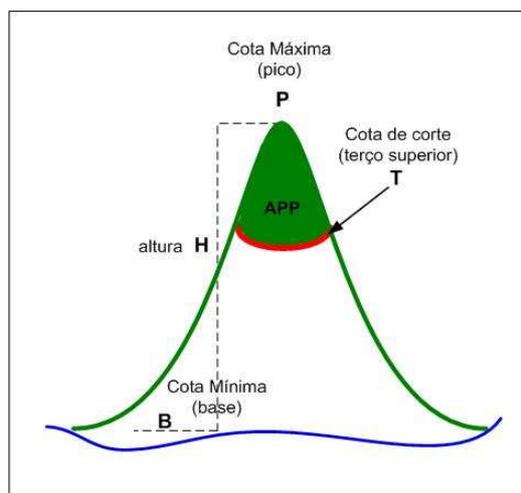


Figura 3.8 - Ilustração da classificação de APP

Para calcular as APP, o terço superior da elevação (T) é obtido, a partir da seguinte equação:

$$T = \frac{2}{3}H + B \quad (3.6)$$

3.3.6 Agrupamento das elevações

As APP para morros e montanhas, cujos cumes estejam separados entre si por distâncias inferiores a 500 metros e que não exista nenhuma hidrografia que os separem, devem ser calculadas a partir da cota de menor valor, ou seja, da cota do morro ou montanha de menor elevação, conforme ilustrado na Figura 3.9. O procedimento utilizado para contemplar este requisito legal é descrito a seguir:

1. Entre todas as elevações classificadas como morros ou montanhas, agrupar aquelas com equidistância menor que 500 m, a partir da elevação do maior altitude;
2. Em cada grupo identificar a de menor altura;
3. Adquirir a cota que define o terço superior dessa elevação menor;
4. Reclassificar as APP das demais elevações com base no novo valor de corte.

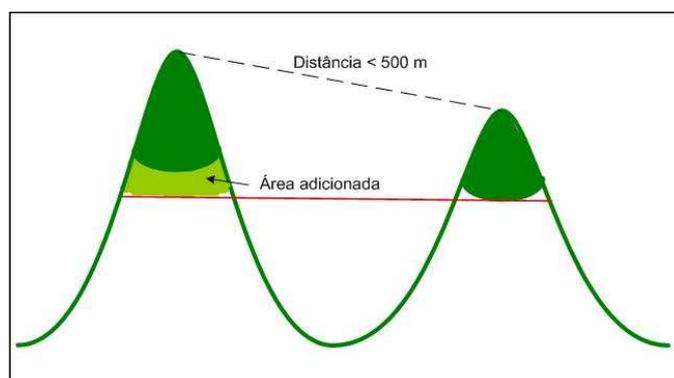


Figura 3.9 - Agrupamento de morros/montanhas

3.4 Processo de avaliação dos resultados

No processo de avaliação dos resultados do algoritmo, foi utilizado como referência (verdade), um mapa produzido manualmente por um especialista. A métrica quantitativa de avaliação utilizada neste trabalho foi o índice de concordância Kappa, medida que indica o grau de concordância entre dois mapas, levando em consideração as probabilidades de as concordâncias terem acontecido ao acaso (Congalton, 1999).

Com objetivo de avaliar a incerteza na obtenção dos valores Kappa, adotou-se o processo de simulação Monte Carlo, onde foram sorteados N pontos aleatórios, em uma sequência de mil repetições, com o objetivo de garantir a independência dos pontos amostrados.

Vários testes foram feitos para a escolha do valor de N (números de pontos aleatórios). Adotou-se N=600 visto que a partir deste numero de amostras ocorre uma estabilização da variância, conforme evidenciado no gráfico mostrado Figura 3.10.

Para que esta avaliação fosse possível, foi desenvolvido um algoritmo utilizando a biblioteca de geração de números aleatórios MTREND (Matsumoto e Nishimura, 2010).

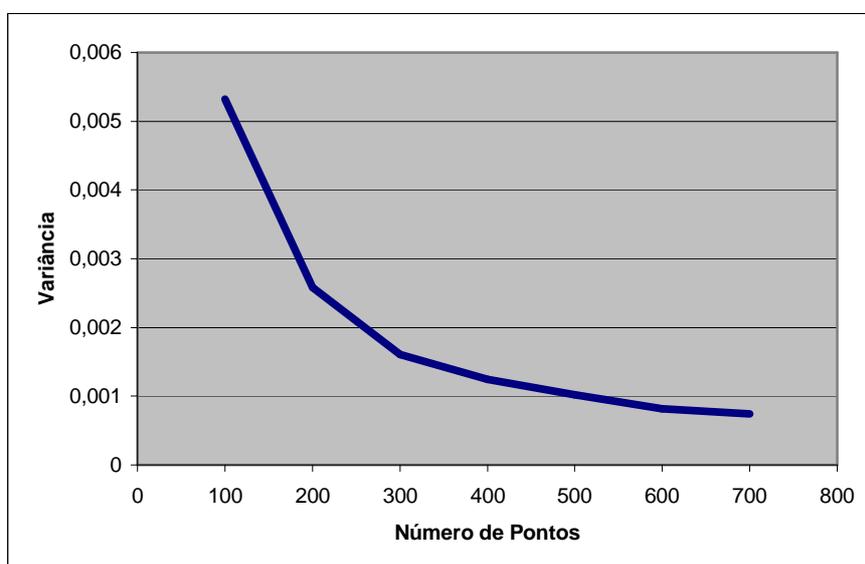


Figura 3.10 - Variância em função do numero de pontos amostrais

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados para avaliar a metodologia descrita no Capítulo 3, bem como do desempenho do aplicativo implementado. As áreas de estudo (Figura 4.1), compreendem recortes de três diferentes regiões no Vale do Paraíba: Fazenda MC (no município de São José dos Campos), Bacia Itaim (Município de Taubaté) e uma área de loteamento no município de Paraibuna, com dimensões em km² de 12,28, 7,87 e 8,45 respectivamente e caracterizadas por feições de relevo distintas. As Seções 4.1 e 4.2 apresentam os resultados da delimitação automática de topos de morros e montanhas, a Seção 4.3 discute os resultados gerados e finalmente, na Seção 4.4 são apresentados o modelo computacional e a interface do sistema.

A seleção destas áreas se deve à caracterização de diferentes formações de relevo, além da disponibilidade de dados topográficos em escala 1:10.000 gerados a partir de processos fotogramétricos. Para estas três áreas, as APP foram mapeadas através de processo manual e os resultados foram utilizados como referência na avaliação dos resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho.

Conforme pode ser observado na Figura 4.1(a), a área de São José dos Campos é caracterizada por um relevo muito movimentado contendo morros e sequências de morros, sendo que algumas das sequências de morros são caracterizadas por linhas de cumeada. A área de Taubaté, Figura 4.1(b) é caracterizada por relevo movimentado contendo morros e sequências de morros, porém com menos linhas de cumeadas quando comparada à área de São José dos Campos. Por último temos a área de Paraibuna caracterizada basicamente por morros isolados, não tendo configurado em sua paisagem o elemento linha de cumeada.

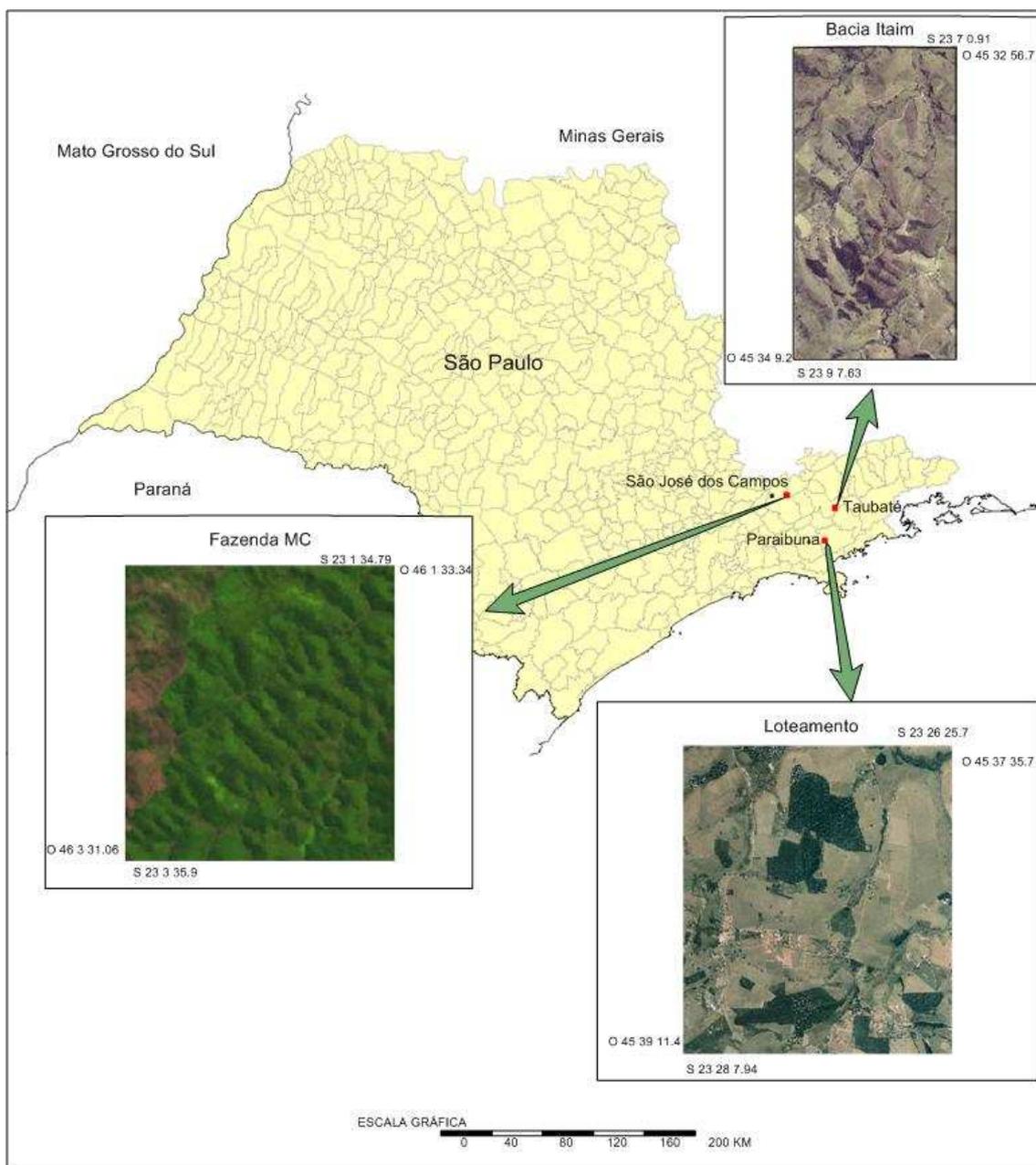


Figura 4.1- Áreas de estudo – recortes dos municípios de: a) São José dos Campos, b) Taubaté e c) Paraibuna.

Os dados altimétricos, assim como a rede hidrográfica, das três áreas de estudo foram obtidos a partir das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo - IGC, na escala 1:10.000. Os dados altimétricos em formato vetorial foram transformados para o formato de MDT, a partir do aplicativo Geração de Grade, implementado no SPRING e que utiliza o modelo de grade triangular e regular.

Os experimentos foram realizados e discutidos conforme etapas estabelecidas na metodologia, item 3.3, e são apresentados a seguir.

4.1 Geração de APP em topos de morros e montanhas isoladamente

Os mapas de APP resultantes da aplicação do algoritmo para as três áreas de estudo, considerando apenas a primeira etapa do processo, que analisa os morros e montanhas isoladamente, encontram-se na Figura 4.2 a seguir, ilustrada pela cor verde. As linhas em vermelho mostram os polígonos obtidos a partir do processo manual realizado por um especialista. Devem-se desconsiderar as bordas das áreas analisadas, visto que o MDT no seu entorno, e não contemplado no processo, pode modificar os resultados.

A análise visual, comparativa entre as três áreas, evidencia uma aderência significativa dos resultados obtidos automaticamente, quando comparados aos resultados obtidos manualmente, para a área de Paraibuna que apresenta morros isolados (Figura 4.2. (c)), enquanto que para as áreas de estudo contendo linhas de cumeadas e morros com topos próximos (<500m), houve uma omissão de APP, conforme pode ser verificado na Figura 4.2 (a) e (b).

A análise estatística realizada através do índice Kappa e apresentada na Figura 4.3 confirmam as evidências observadas em nossa análise visual. Enquanto o índice de aderência alcançado para a área de Paraibuna foi de 0,94 com desvio padrão de +/- 0,03, os índices para as áreas correspondentes aos municípios de São José dos Campos e Taubaté foram de 0,76 +/- 0,04 e 0,67 +/- 0,03, respectivamente.

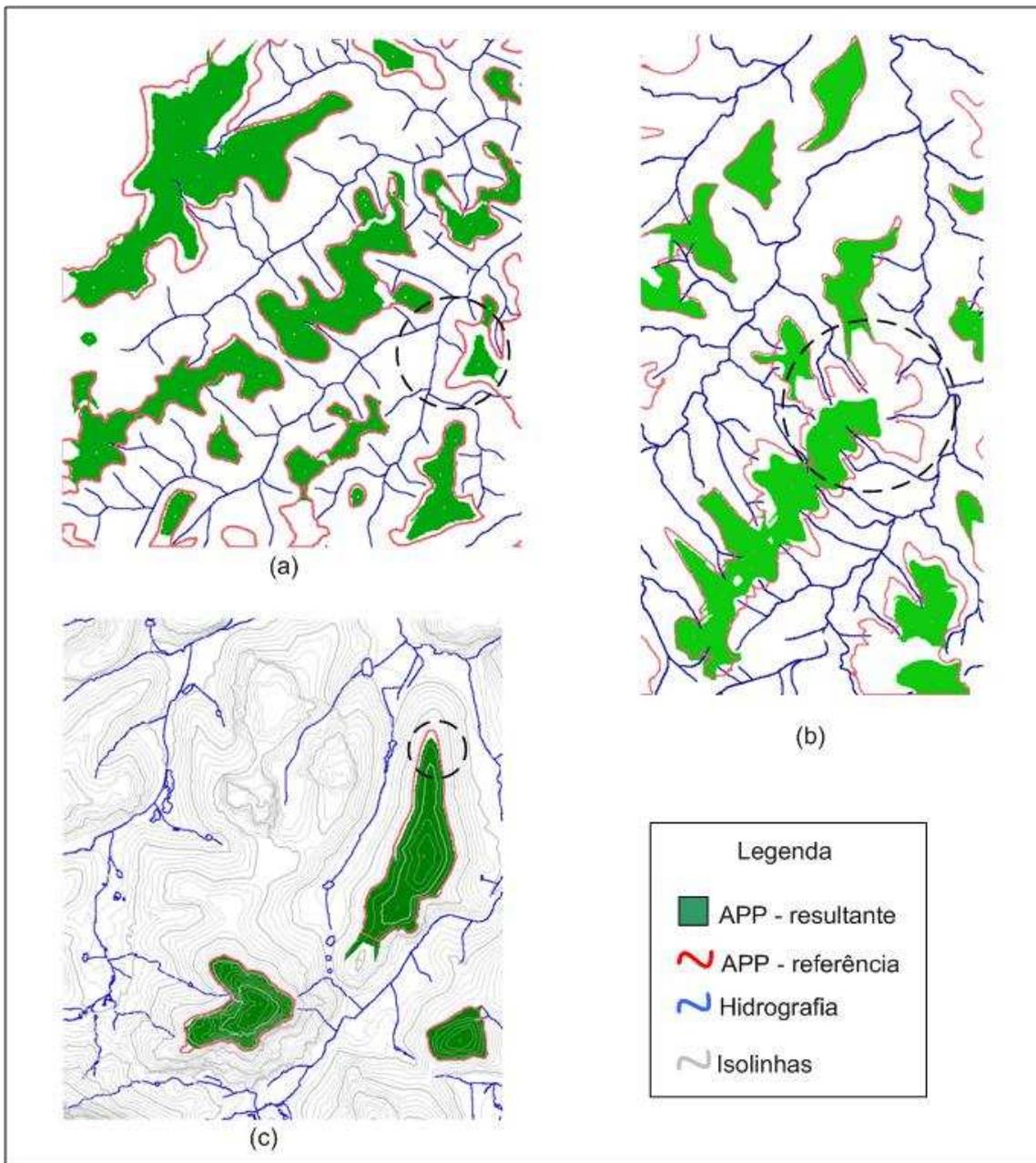


Figura 4.2 - Mapas de APP nos topos de morros das áreas (em destaque às áreas de omissão): a) São José dos Campos, b) Taubaté e c) Paraibuna

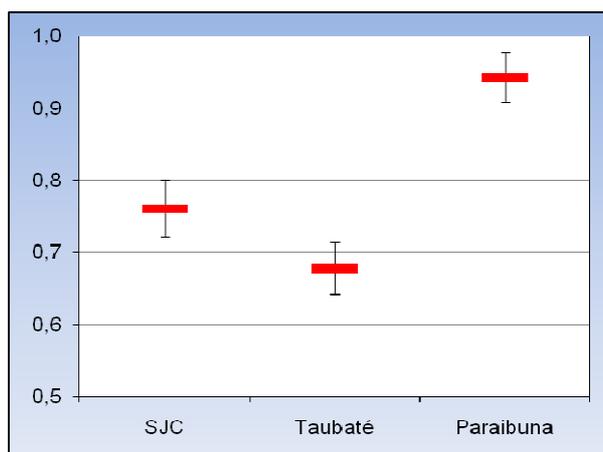


Figura 4.3 - Distribuição dos valores estimados Kappa – Primeira Etapa.

4.2 Geração de APP em topos de morros considerando o parâmetro de proximidade inferior a 500 metros

Nesta segunda etapa do experimento foi incorporado o parâmetro da lei que estabelece que elevações classificadas como morros e cujos topos estejam a uma equidistância igual ou inferior a 500 metros devem ser agrupadas para fins de cálculo de APP. Neste caso, as APP definidas pela cota do menor morro devem ser incorporadas para o morro de maior cota. Isto implica na expansão das áreas de APP, conforme pode ser observado na Figura 4.4.

Observa-se através de análise visual da Figura 4.4 que para a área correspondente a Paraibuna houve uma pequena melhoria no índice de aderência dos resultados obtidos pelo método automático, onde se verifica o mapeamento completo de APP. Por outro lado, esta mesma área continuou mantendo uma pequena inclusão de APP, que deve estar associado a alguma falha na geração do MDT.

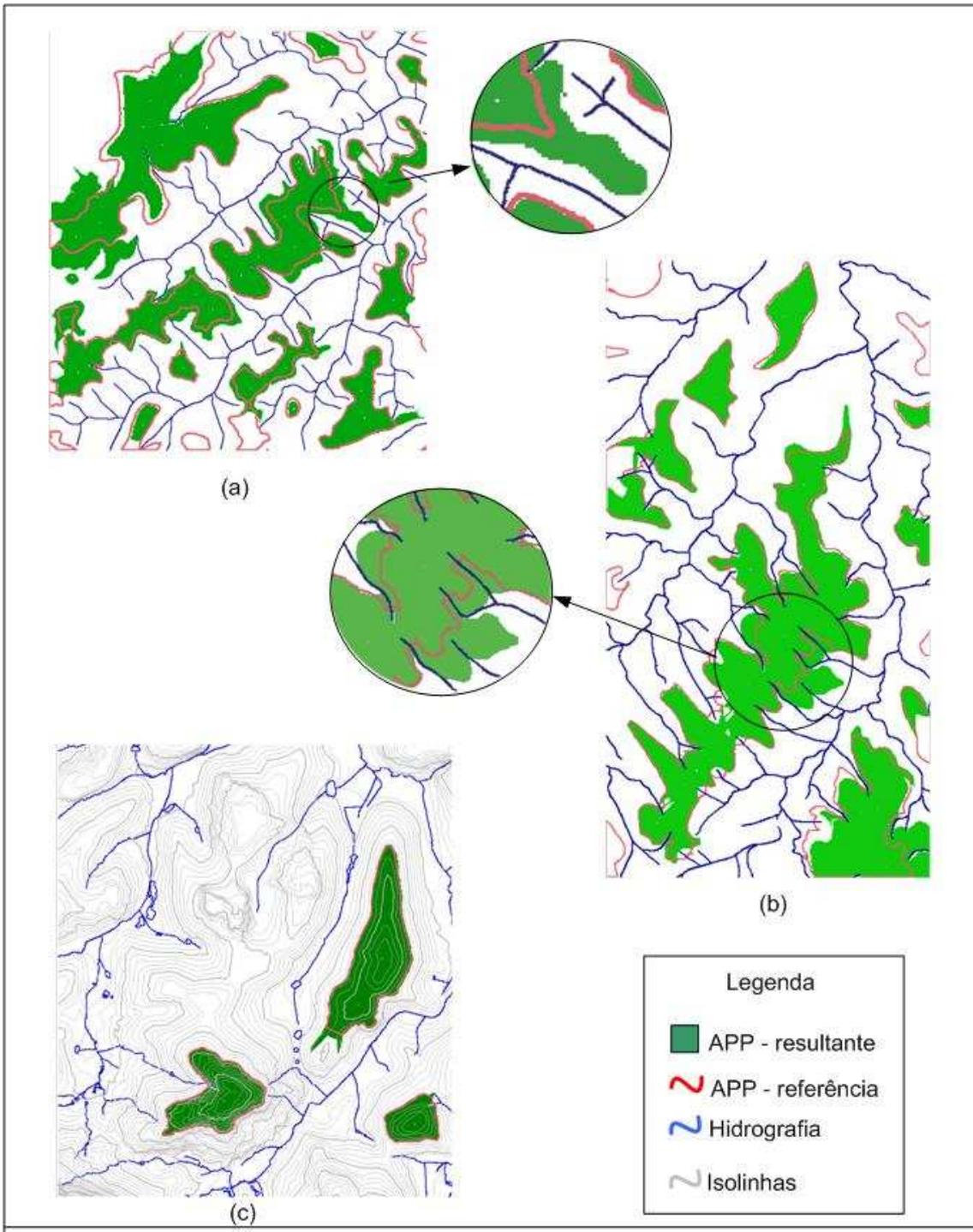


Figura 4.4 - Mapas de APP nos topos de morros e montanhas considerando o agrupamento de morros com topos com proximidade inferior a 500 metros (com destaque às áreas de inclusão): a) São José dos Campos, b) Taubaté e c) Paraibuna.

Para as áreas correspondentes a São José dos Campos e Taubaté verificam-se alterações substanciais nas áreas de APP obtidas pelo processo automático e que podem ser observadas visualmente, com incorporação de área significativa de APP, extrapolando-se em muitos pontos os limites obtidos pelo processo manual.

A análise visual da Figura 4.4 (a) e (b) deixa evidente que para as áreas onde temos caracterizado o elemento linha de cumeada, as APP calculadas pelo algoritmo extrapolam os seus limites, deixando claro um significativo nível de inclusão de áreas de não APP. Neste caso, poucas e pontuais áreas de omissão são observadas, as quais certamente serão incluídas quando da incorporação do parâmetro linha de cumeada no processo de cálculo de APP.

O resultado da estatística Kappa (Figura 4.5) para esta etapa do experimento confirma uma pequena alteração para a área de Paraibuna, deixando o resultado próximo de 100% de aderência à realidade (0,96 +/- 0,02). Para a área correspondente a São José dos Campos tivemos uma piora do índice de aderência que passou de 0,76 +/- 0,04 para 0,69 +/- 0,04, que se deve a inclusão exagerada de APP, que na verdade não são APP. Para a área correspondente a Taubaté observa-se uma melhora do índice de aderência passando de 0,67 +/- 0,03 para 0,76 +/- 0,03. Verifica-se neste experimento que a variação do índice Kappa é influenciada pelo tipo de relevo, como também da inter-relação entre os parâmetros que são inseridos no processo de cálculo das APP.

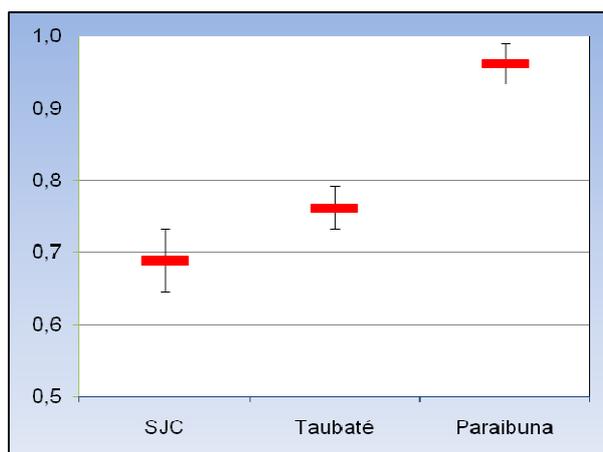


Figura 4.5 - Distribuição dos valores estimados Kappa – Segunda Etapa

4.3 Avaliação dos resultados e discussão

Os bons resultados alcançados evidenciam a viabilidade de automatização do processo de cálculo de APP para topos de morros e montanhas. Ainda que não tenha sido contemplada a inserção do parâmetro linha de cumeada, no desenvolvimento do algoritmo, verificam-se vantagens significativas do processo utilizado neste trabalho, quando comparados a outros processos propostos.

Entre as principais vantagens do processo desenvolvido neste trabalho podemos destacar a eliminação da subjetividade no cálculo de topos de morros e de suas respectivas bases, quando realizadas no processo manual ou semi-automático. Outra vantagem, não menos importante, é a menor demanda de edição manual do resultado.

Conforme ilustrado nas Figuras 4.6 e 4.7, no processo atualmente implementado no SPRING, as isolinhas que representam o terço superior “se prolongam” deixando de fechar o polígono daquela elevação em questão, necessitando conseqüentemente da edição manual.

Considerando a influência da inter-relação entre os parâmetros que definem as APP em topo de morro e montanha, observada nos resultados deste trabalho, se faz necessário o desenvolvimento da terceira etapa de desenvolvimento deste experimento para que tenhamos resultados mais conclusivos sobre sua aplicabilidade de forma totalmente automática.

Não obstante, os resultados já permitem a aplicação do algoritmo para cálculo de APP para áreas que não possuem linhas de cumeadas, ou mesmo para outras áreas como uma primeira aproximação das áreas de APP, a qual serviria de base para a sua delimitação.

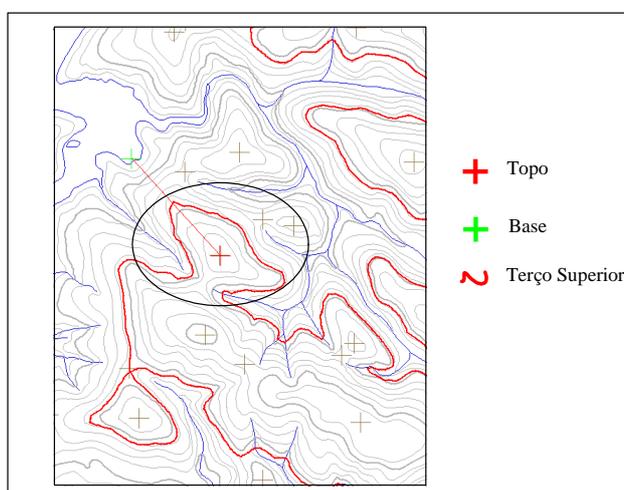


Figura 4.6 - Delimitação do terço superior utilizando as isolinhas (em destaque a elevação que se deseja mapear)

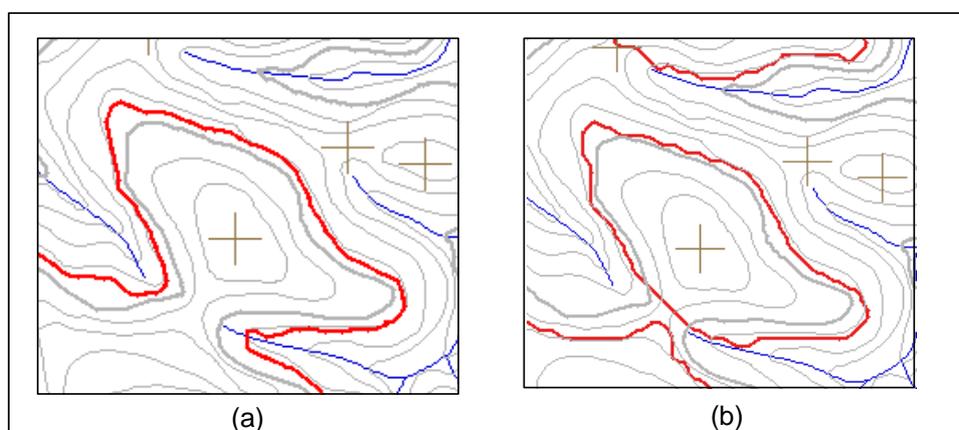


Figura 4.7 - (a) Terço Superior – delimitação utilizando as isolinhas (b) Terço Superior – delimitação por classificação de cotas

4.4 Modelo Computacional e implementação do algoritmo

O algoritmo de delimitação de APP em topos de morros e montanhas foi implementado no ambiente SPRING (Câmara et al., 1996), por se tratar de um Sistema de Informações Geográficas – SIG bastante utilizado para este propósito e que pode ser obtido sem custo para o usuário.

Conforme apresentado anteriormente na metodologia, o algoritmo utiliza como entrada dois planos de informação, sendo um da classe numérica MDT e o outro da classe temática Hidrografia. A saída deste algoritmo é um mapa temático com 2 temas: áreas de APP e Não APP.

A Figura 4.8 apresenta o diagrama da classe desenvolvida (DemNet) para dar suporte às operações para delimitação de APP em topos de morros e montanhas. A classe possui um método de inicialização, cujos parâmetros “default” de definição da elevação são aqueles estabelecidos pela Resolução CONAMA 303/02. O algoritmo de *multicaminhos* apresentado no Item 3.3.2 foi implementado no método `Top_to_down`.

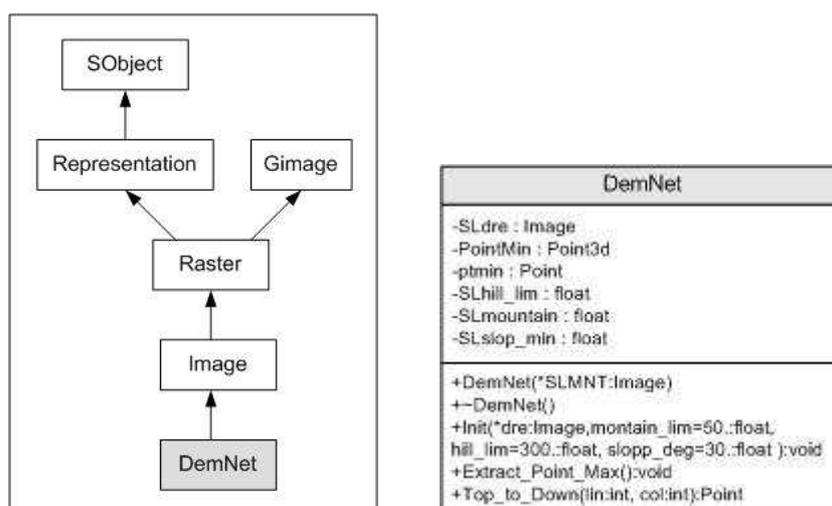


Figura 4.8 – Diagrama de heranças da classe DemNet

Para permitir sua execução, foi desenvolvida uma interface, onde o processo de delimitação de APP manual (já implementado anteriormente) foi mantido. A Figura 4.9 ilustra a interface do sistema que tem como dados de entrada os seguintes parâmetros:

- Escolha do tipo de delimitação de APP: Manual ou Automático
- Para o caso Automático: Plano de Informação (PI) da Drenagem
- Saída
- Para o caso Manual: Ponto máximo e ponto mínimo de cada elevação



Figura 4.9 - Interface do Sistema

De modo a avaliar a eficiência da ferramenta de delimitação de APP em topos de morros e montanhas, foi utilizado um conjunto de dados testes com diferentes dimensões e seu tempo de execução calculado. Para cada conjunto de dados foi calculado o número de pontos de máximo do MDT (pontos candidatos a pico), pois representa a frequência em que a função Top_to_down é executada. A Tabela 4.1 apresenta os valores dos tempos, bem como o número de elevações com APP encontrados para cada dado. Os tempos em

função da dimensão dos dados são apresentados em forma de gráfico na Figura 4.10.

O experimento foi realizado em uma configuração Genuine Intel(R) CPU T2500 @ 2.00 GHz, com 2GB de memória RAM, no sistema operacional *Windows XP SP3*.

Tabela 4.1 - Tempo de execução da ferramenta proposta para diferentes conjuntos de dados

| Número de pontos do MDT | Número de pontos candidatos a pico | Topos com APP encontrados | Tempo de execução | Tempo estimado no processo manual |
|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1000000 | 590 | 248 | 1m 19s | 19m 45s |
| 810000 | 476 | 246 | 57s | 14m 15s |
| 640000 | 389 | 242 | 41s | 10m 6s |
| 490000 | 290 | 209 | 27s | 6m 45s |
| 360000 | 215 | 178 | 17s | 4m 15s |
| 250000 | 113 | 102 | 9s | 2m 15s |
| 160000 | 111 | 100 | 7s | 1m 45s |
| 90000 | 70 | 63 | 4s | 1m |
| 40000 | 24 | 22 | 3s | 45s |
| 10000 | 10 | 8 | 2s | 30s |

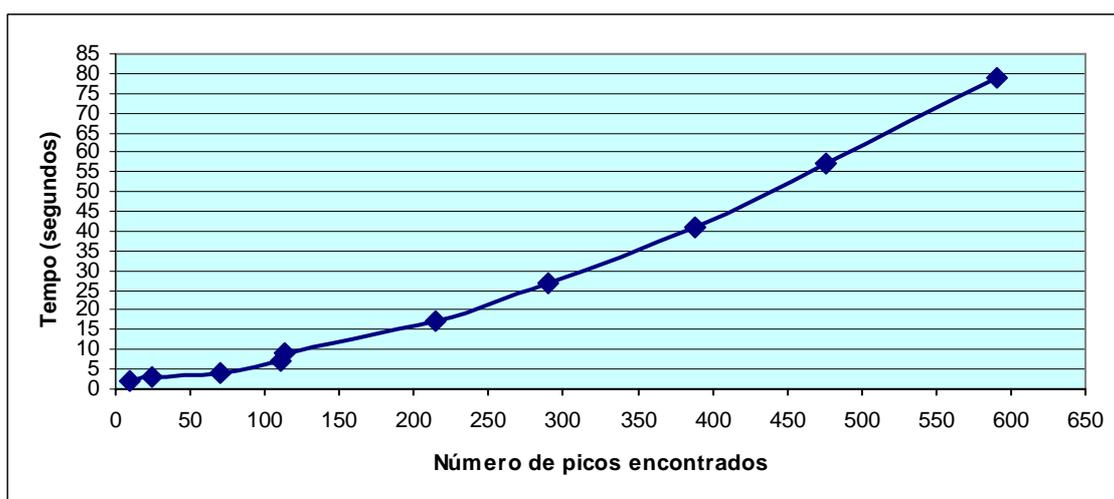


Figura 4.10 - Tempo de execução em função do número de picos encontrados em diferentes tamanhos de MDT

O tempo de processamento obtido através do teste aplicado para diferentes tamanhos de grade MDT (Tabela 4.1), evidencia um desempenho altamente satisfatório do algoritmo, quando comparado ao tempo de execução manual. Reside neste resultado de desempenho uma das grandes contribuições deste trabalho, principalmente quando consideramos que a maior parte do mapeamento de APP em topos de morros e montanhas ainda esta por ser executada.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O mapeamento de APP através do processo manual é considerado um trabalho que demanda conhecimento na caracterização dos tipos de relevo, bem como de aspectos relativos à lei das APP que são subjetivas, tornando este trabalho complexo e de alto custo para o usuário.

Alcançar um resultado 100% aderente ao processo manual consiste em um trabalho longo de modelar o algoritmo para que, reconhecendo cada circunstância típica do mundo real, consiga aplicar os parâmetros e critérios da lei para aquele caso.

Os resultados alcançados neste trabalho, com índices Kappa de 0,69 a 0,95, dependendo do tipo de relevo, permitiram a implementação de um algoritmo no SPRING que resolve parcialmente a geração automática de APP em topos de morros e montanhas, com índice de aderência próximo a 100% ao processo manual, para relevos de morros isolados.

No sentido de dar mais segurança aos usuários na geração de APP, sugere-se estender a avaliação deste algoritmo para um número maior de áreas, de modo a certificar-se dos resultados.

Sugere-se a continuidade deste trabalho para que possa ser concluído o desenvolvimento de algoritmo para geração APP em linhas de cumeadas, tornando o processo totalmente automatizado.

Sugere-se ainda que seja definida pelo CONAMA a escala cartográfica aceitável dos dados de entrada do sistema, para que os resultados possam ser reconhecidos para fins de aplicação da Lei.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, S.. O “novo” código florestal brasileiro: conceitos jurídicos fundamentais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8., 2003, São Paulo, SP. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Silvicultura; Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 2003. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/florestal/download/SAhrensCodigoFlorestal.pdf>. Acesso em 10/05/2009.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE ESRI. **ArcGIS**. using ArcGIS desktop. 2006. Disponível em <http://www.esri.com/library/fliers/pdfs/learning-gis.pdf>. Acesso em 10/05/2008.

BARBOSA, E. C. **Mapeamento da ocupação da terra e adequação à legislação ambiental na região do alto sub-bacia do Ribeirão da Mata com o auxílio de Sensoriamento Remoto e técnicas de geoprocessamento.** p.78. Monografia do Curso de pós-graduação em Geoprocessamento – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BATISTA R.E.; NEVES M.F. **SPRING** – Sistema de Processamento de Informações Georeferencias. Disponível em <http://200.199.231.226/portal/publicacao/arg/spring.pdf>. Acesso em 10/05/2010.

BRASIL. **Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965** - Institui o novo Código Florestal. Brasília, 1965.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002** . Dispõe parâmetros e definições e limites de áreas de preservação permanente. Brasília, 2002.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS U.M.; GARRIDO J. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Computers & Graphics**, v.20, n. 3, p. 395-403, maio-Jun 1996.

CATELANI, S. C.; BATISTA, G. T. Mapeamento de Áreas de Preservação Permanente (APP) do município de Santo Antonio do Pinhal, SP: um subsídio à preservação ambiental. **Revista Ambi-Água**, v.2, n. 1, p. 30-42, 2007. Disponível em <http://www.agro.unitau.br/seer/index.php/ambi-agua>. Acesso em 21/05/2009.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices.** London: Lewis Publishers, 1999. 137p.

COTA, M. A., MOURA, A. C. M. Áreas de preservação permanente (APP) – estudo de caso sobre o parâmetro declividade e as divergências nos resultados de mapeamento em função das bases cartográficas e escalas e/ou softwares utilizados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14.,

2009. Natal, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 3697-3704.

CREPANI, E. **Algumas considerações sobre geomorfologia e a legislação sobre APP de topo de morros.** Mensagem recebida por silvia@dpi.inpe.br em 10/02/2009.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling.** Norwood: Artech House, INC., 2005. p.257.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage Networks from grid elevation models. **Water Resources Research**, v.27, p. 709-717, 1991.

HOTT, M. C.; GUIMARAES, M.; MIRANDA, E. E. Um método para determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2005 Goiânia, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3061-3068.

JONES, K. H. A comparison of algorithms used to compute Hill slope as a property of DEM. **Computers & Geosciences**, v.24, p.315-323, 1998.

LUCENA, I. S. **Projeto de interfaces para álgebra de mapas em geoprocessamento no ambiente SPRING.** 1998. 126 p. (INPE-9307-TDI/820). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1998. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2003/01.16.10.18>>. Acesso em: 13 set. 2010.

MARK, D. M. Automatic detection of drainage networks from digital elevation models. **Cartographica**, v.21, p.168-178, 1984.

MATSUMOTO M., NISHIMURA T. **C++ Mersenne Twister pseudo-random number generator.** Disponível em <http://www.bedaux.net/mtrand/>. Acesso em 10/02/2010.

NASCIMENTO, M. C.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; SILVA, E. Delimitação automática de Áreas de Preservação Permanente (APP) e identificação de conflito de uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Alegre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2289-2296. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.18.18.26>>. Acesso em: 13 set. 2010.

O'CALLAGHAN J. F. ; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v.28, p.323-344, 1984.

QUINN, P.; BEVEN K.; CHEVALLIER P. ; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v.5, p.59-79, 1991.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; CARVALHO JUNIOR, O.A. FERNANDES, F.N. ; GOMES, R.A.T. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.4, n.2, p.41-49, 2003.

REIS, R. B.; CARDOSO, P. V.; CRUZ, C. B. M.; VICENS, R. S. Mapeamento e caracterização das Áreas de Preservação Permanentes (APPs) na Área de Proteção Ambiental do Rio São João/Mico Leão Dourado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5397-5404. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.13.37>>. Acesso em: 13 set. 2010.

RIBEIRO, C.A.A.S.; OLIVEIRA, M.J.; SOARES, V.P.; PINTO, F.A.C. Delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morro e em linhas de cumeada: metodologia e estudo de caso. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 5., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2002.

TRIBE A. Automated recognition of valley lines and drainage network from grid digital elevation models: a review and a new method. **Journal of Hydrology**, v.139, p.263-293, 1992.

ZHOU, Q.; LIU X. Error assessment of grid-based flow routing algorithms used in hydrological models. **Int. J. Geographical information science**, v.16, n.8, p.819-842, 2002.

APENDICE A - Legislação Ambiental para as APP

O Código Florestal brasileiro instituído pela Lei nº 4.771 de 15 de setembro de 1965 em despeito de sua edição há 44 anos, ainda é objeto de pouco conhecimento e muita controvérsia. Segundo Ahrens (2003), muitos sabem da sua existência, alguns conhecem (parcialmente) seu conteúdo; mas poucos proprietários de terra aceitam-no como instrumento válido e legítimo para a proteção do patrimônio florestal brasileiro.

A preocupação dos proprietários rurais na preservação das APP somente teve início com a entrada em vigor da lei 9.605/98, conhecida como a Lei de Crimes Ambientais, que dispõe no seu artigo 38, que “destruir ou danificar vegetação considerada de preservação permanente é crime ambiental, passível de pena de detenção de um a três anos ou multa, ou ambas as penas cumulativamente”.

Diversas modificações foram incorporadas ao Código Florestal de 1965 através de emendas e edição de novas leis, entre as quais podemos destacar a Lei nº 5.868 de 1972, Lei nº 6.535 de 1978, Lei nº 7.511 de 1986 e Lei nº 7.803 de 1989. Porém, mudanças substanciais e importantes foram incorporadas ao Código Florestal pela Medida Provisória nº 2.166-67 de 25/08/2001, atualmente vigente por força da Emenda Constitucional nº32, de 11/09/2001, e posteriormente regulamentada pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 303/02. O Código Florestal estabelece critérios e parâmetros de preservação segundo dois aspectos: (1) a Reserva Legal e, (2) as APP.

Nos termos do código florestal, Área de Preservação Permanente é a área coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem estar das populações humanas (Brasil, 1965).

No que concernem as APP, pode-se destacar como um avanço significativo para sua aplicabilidade, a Resolução CONAMA nº303, de 20 de março de 2002, cujo objetivo foi o de regulamentar o Artigo 2º e 3º do Código Florestal, dispondo sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Porém, alguns critérios e definições relativas a esta resolução ainda careçam de maior detalhamento, visto as controvérsias que têm sido geradas quanto a sua interpretação.

A Resolução CONAMA 303/02 estabeleceu como APP aquelas localizadas ao longo dos rios, nascentes, veredas, dunas, restingas, lagos e lagoas, manguezal, em áreas de altas altitudes, bem como em áreas com aspectos específicos associados ao relevo (declividade, topo de morro, escarpas, etc.). Considerando que para este trabalho, o interesse está voltado aos aspectos das APP associados ao relevo, encontram-se abaixo descritos e exemplificados na forma de figura alguns termos e parâmetros que caracterizam seus diferentes formatos. Maiores detalhes sobre as definições e parâmetros podem ser encontrados na Resolução CONAMA 303/02 (APENDICE B).

O relevo é um elemento do terreno caracterizado por elevações e que define diferentes formas de paisagens, sendo as mais importantes para este trabalho o morro e a montanha. Basicamente, o que diferencia um do outro é a altura do topo com relação à base. Conforme ilustrado na Figura A. 1, morro ou montanha pode ser definido por três elementos, ou seja, Pico ou Topo, Base e Altura.

O pico ou topo é caracterizado pelo ponto de maior altitude de uma elevação, a partir do qual a água escorre em todos os sentidos. A definição deste elemento é fundamental para este trabalho, tanto na caracterização do tipo de relevo quanto no processo matemático para a definição das APP.

Relativo ao elemento base de topo de morro ou montanha, sua definição é dada pela Resolução CONAMA 303/02 como: plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor. Esta definição tem gerado muita divergência quanto à sua interpretação e, por consequência, tem levado a obtenção de resultados divergentes segundo cada uma das diferentes interpretações. Merece destaque e sugere-se a leitura do trabalho desenvolvido por Crepani (2009), para um maior entendimento quanto ao conceito e interpretação de base de topo de morro.

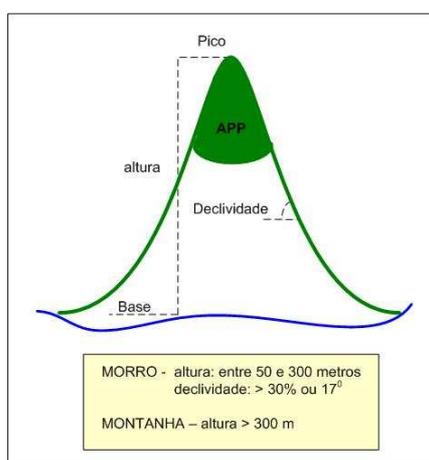


Figura A. 1- Esquema ilustrativo dos elementos necessário na definição de uma elevação

O terceiro elemento importante na definição e caracterização de morro ou montanha é a altura obtida entre o seu pico e sua base. Assim, quando a altura for maior que 50 metros e menor que 300 metros temos caracterizado um morro. No caso do morro um quarto elemento se faz necessário para sua caracterização, ou seja, que sua encosta, em algum ponto, possua declividade maior que trinta por cento (aproximadamente dezessete graus). Havendo uma altura superior a 300 metros, temos um relevo caracterizado como montanha.

Outro elemento de relevo que merece destaque é a Linha de Cumeada, pois sua ocorrência é determinante no mapeamento de APP. Trata-se de uma linha imaginária que une os pontos mais altos de uma sequência de morros ou

montanhas, constituindo-se no divisor de águas. A obtenção automática deste elemento constitui-se num dos grandes desafios para a automatização do processo de geração de mapeamento de APP, visto a dificuldade de modelagem e classificação das múltiplas formas de relevo encontradas na natureza.

Resumidamente verifica-se que, embora a Resolução do CONAMA deixe relativamente clara os critérios e definições para a delimitação das APP, sua materialização tem gerado controvérsia, principalmente devido à dificuldade e subjetividade na definição de base de morro ou montanha. Esta subjetividade ou dificuldade em objetivar um critério que leve a um mesmo procedimento na determinação do ponto de base de morro ou montanha, tem levado alguns autores a diferentes interpretações, ou mesmo ao estabelecimento de critérios próprios. Por consequência, as APP podem representar maior ou menor percentual de uma propriedade, variando segundo o critério e o técnico que a determinou.

APENDICE B - Resolução CONAMA 303/02 - Art. 2º e Art. 3º

B.1 DEFINIÇÕES

- Morro: elevação do terreno com cota do topo em relação a base entre cinquenta e trezentos metros e encostas com declividade superior a trinta por cento (aproximadamente dezessete graus) na linha de maior declividade;
- Montanha: elevação do terreno com cota em relação a base superior a trezentos metros;
- Base de morro ou montanha: plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor;
- Linha de cumeada: linha que une os pontos mais altos de uma sequência de morros ou de montanhas, constituindo-se no divisor de águas;
- Escarpa: rampa de terrenos com inclinação igual ou superior a quarenta e cinco graus, que delimitam relevos de tabuleiros, chapadas e planalto, estando limitada no topo pela ruptura positiva de declividade (linha de escarpa) e no sopé por ruptura negativa de declividade, englobando os depósitos de colúvio que se localizam próximos ao sopé da escarpa;

B.2 PARÂMETROS

Constitui APP :

- No topo de morros e montanhas, em áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura mínima da elevação em relação a base;

- Nas linhas de cumeada, em área delimitada a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura, em relação à base, do pico mais baixo da cumeada, fixando-se a curva de nível para cada segmento da linha de cumeada equivalente a mil metros;
- Em encosta ou parte desta, com declividade superior a cem por cento ou quarenta e cinco graus na linha de maior declive;
- Nas escarpas e nas bordas dos tabuleiros e chapadas, a partir da linha de ruptura em faixa nunca inferior a cem metros em projeção horizontal no sentido do reverso da escarpa;

Parágrafo único. Na ocorrência de dois ou mais morros ou montanhas cujos cumes estejam separados entre si por distâncias inferiores a quinhentos metros, a APP abrangerá o conjunto de morros ou montanhas, delimitada a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura em relação à base do morro ou montanha de menor altura do conjunto, aplicando-se o que segue:

- a) Agrupam-se os morros ou montanhas cuja proximidade seja de até quinhentos metros entre seus topos;
- b) Identifica-se o menor morro ou montanha;
- c) Traça-se uma linha na curva de nível correspondente a dois terços deste; e
- d) Considera-se de preservação permanente toda a área acima deste nível.