



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15318-RPQ/818

**TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS
GEOMORFOLÓGICOS LOCAIS**

Márcio de Morisson Valeriano

Do projeto de Produtividade em Pesquisa “Modelagem de dados topográficos SRTM”,
CNPq, processo nº 306021/2004-8 (NV).

INPE
São José dos Campos
2008

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

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) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15318-RPQ/818

**TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS
GEOMORFOLÓGICOS LOCAIS**

Márcio de Morisson Valeriano

Do projeto de Produtividade em Pesquisa “Modelagem de dados topográficos SRTM”,
CNPq, processo nº 306021/2004-8 (NV).

INPE
São José dos Campos
2008

“Assim que se viu fora da garrafa, o capeta pôs-se a dançar e a fazer cabriolas com tanto prazer que o menino ficou arrependido de por tantos dias ter conservado presa uma criaturinha tão irrequieta e amiga da liberdade”.

(Monteiro Lobato, “O Saci”)

Aos que começam; aos que vêm depois; aos novos; aos que estão por vir; enfim, àqueles que dirigem seu olhar ao futuro mais do que ao passado, não importa a idade.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa associada a este trabalho.

Às estudantes Polyanna da Conceição Bispo (UFSCAR) e Letícia Midori Arashiro (UNITAU), que se dedicaram a atividades do projeto através de seus estágios, ainda na graduação.

A aplicação de resultados em pesquisas acadêmicas foi crucial para a percepção das demandas que justificam este projeto. Assim, não se poderia deixar de mencionar os mestrados, na PG-SER (INPE), de Elienê Pontes de Araújo, Polyanna da Conceição Bispo e Viviana Aguilar Muñoz (em andamento) como ricos laboratórios de testes. Da mesma forma, agradecemos a oportunidade de atuação em projetos de variados temas e instituições, pelo olhar de cliente, ao mesmo tempo neutro e crítico, que estes oferecem:

NEGOWAT (IAC/CIRAD; FAPESP, coord. Raphaële Ducrot - CIRAD); *Integração de dados biológicos e geológicos no baixo Tocantins-Ilha do Marajó: chave na análise da biodiversidade* (FAPESP, coord. Dilce de Fátima Rossetti - INPE); *Sistema para monitoramento da regularização ambiental no espaço rural de Mato Grosso do Sul* (coord. João dos Santos Vila da Silva - EMBRAPA); *Estratégias, modelos e geotecnologias para a caracterização e monitoramento da agrossistemas cafeeiros de Minas Gerais* (CNPq, coord. Helena Maria Ramos Alves – EMBRAPA; UFLA); *Dados SAR/RADARSAT-2 para avaliar estrutura da vegetação na Floresta Nacional de Tapajós* (CNPq, coord. Yosio Edemir Shimabukuro - INPE), além de numerosas outras interações não-formalizadas.

Aos inúmeros correspondentes, ora anônimos, cujos pedidos, dúvidas, demandas e informações constituíram a força e a direção da iniciativa TOPODATA. Creio que muitos destes estão aptos a dar prosseguimento a este trabalho, apenas iniciado.

Enfim, aos amigos, aos professores e aos familiares, pela cumplicidade involuntária que tomo de vocês nos mínimos gestos.

RESUMO

Este documento tem como objetivo orientar os usuários dos produtos gerados na iniciativa TOPODATA, que oferece livre acesso a variáveis geomorfométricas locais derivadas de dados SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) para todo o território nacional. Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por krigagem. Em seguida, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada para evidenciar talvegues e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes para favorecer a interpretação das feições de drenagem e caracterização de sua estrutura. As variáveis geomorfométricas foram ainda classificadas para a geração de mapas não-numéricos, tais como as classes de declividade consagradas pela pesquisa agrônoma (classes EMBRAPA, por exemplo), as curvaturas em convexo/planar/côncavo, bem como possíveis formas de vertentes, entre outras representações qualitativas. O uso apropriado destes resultados requer o conhecimento de aspectos prévios à sua obtenção, como as características dos dados e suas relações com propriedades do terreno, além dos conceitos e métodos envolvidos nas derivações e, por fim, formas adequadas de representação.

TOPODATA: LOCAL GEOMORPHOMETRIC DATA USER'S GUIDE

ABSTRACT

This document was designed to guide users of TOPODATA products, a project which offers free access to local geomorphometric variables derived from SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) data, throughout the entire Brazilian territory. SRTM data was refined from the original resolution of 3 arc-seconds (~90m) to 1 arc-second (~30m) through kriging. The refined data was derived with geomorphometric analyses algorithms to calculate slope (steepness), slope direction, plan curvature and profile curvature. In addition to these, a second order derivation was applied to enhance thalweg and divides, which were overlaid on a slope direction presentation, as input for the interpretation of drainage features and structure. The geomorphometric variables were further classified into meaningful intervals to generate non-numerical maps, widely accepted by agricultural research (like EMBRAPA slope classes, for example), as well as convex/planar/concave curvatures and slope forms, among other qualitative presentations. The proper use of these results require previous comprehension of their calculation, their characteristics and relations with terrain properties, besides the theoretical concepts and methods of derivation and, finally, adequate presentation forms.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	19
2 FUNDAMENTOS	21
2.1 Modelos Digitais de Elevação e dados SRTM	21
2.2 Derivações geomorfométricas locais.....	25
2.2.1 Declividade	26
2.2.2 Orientação de vertentes.....	25
2.2.3 Curvatura vertical.....	25
2.2.4 Curvatura horizontal.....	38
2.2.5 Forma do terreno	41
2.2.6 Delineamento de microbacias.....	42
3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	49
3.1 Planos de informação.....	49
3.2 Arquivos, formatos, aplicativos e conversões.....	51
3.3 Esquemas de visualização – paletas	54
3.3.1 Altimetria	55
3.3.2 Declividade	57
3.3.3 Orientação de vertentes.....	59
3.3.4 Curvaturas (horizontal e vertical)	61
3.3.5 Forma do terreno	63
3.3.6 Delineamento de microbacias.....	65
3.4 Representações em formato TIF.....	67
3.4.1 Codificação das representações TIF	67
3.4.2 Georreferência.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Isolinhas em diferentes eqüidistâncias verticais.....	24
2.2 - Variáveis geomorfométricas locais derivadas da altimetria.....	25
2.3 - Detalhamento geométrico da declividade em relação à altimetria.	28
2.4 - Desorganização da orientação de vertentes em áreas planas.....	33
2.5 - Curvatura vertical na forma numérica (acima) e em 5 classes (abaixo)...	37
2.6 - Curvatura horizontal na forma numérica (acima) e em 5 classes (abaixo).	40
2.7 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.	41
2.8 - Evidenciação da estrutura de drenagem através do processo ADD.	43
2.9 - Esboço dos divisores de água das principais microbacias sobre altimetria (esq.); vetor de divisores (amarelo) sobrepostos à representação ADD (dir.) para esboço dos canais de drenagem (magenta); organização dos segmentos para o planejamento da digitalização (abaixo).....	45
2.10 - Digitalização final (verde e cian) das feições de drenagem sobre esboço dos divisores de água (amarelo) e dos canais de drenagem (azul) sobrepostos à curvatura horizontal (esq.) e à orientação de vertentes (dir.).	47
2.11 - Situação típica de floresta amazônica, desfavorável para o processo ADD: relevo plano e efeito dossel, na porção sudoeste da área.....	48
3.1 - Relação da declividade e da orientação de vertentes com a geometria do relevo sombreado.	56
3.2 - Apresentação da altimetria sob escala de (A) cinza direta, (B) invertida e relevos sombreados do programa (C) Surfer e (D) Global Mapper (paleta Atlas Shader).	57
3.3 - Paletas para representação da declividade na forma numérica.....	58
3.4 - Paleta circular para representação da orientação de vertentes em graus.	60
3.5 - Paletas para representação das curvaturas vertical e horizontal na forma numérica.	61
3.6 - Legenda de cores da paleta FT para representação das formas de terreno.....	64
3.7 - Ganho de percepção da forma do terreno com o ordenamento das cores em escalas detalhadas (acima) e generalizadas (abaixo). Esquerda: representação com paleta qualitativa default; direita: paleta FT.	65
3.8 - Esquemas colorido e preto-e-branco de representação do delineamento de microbacias.	66
3.9 - Esquema de georreferência dos arquivos TIF. No exemplo estão coordenadas correspondentes à folha de nome 15_465.	69

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Comparação entre diferentes limites rígidos de classes de declividade para avaliação de terras.....	31
3.1 - Identificação dos arquivos/planos de informação.....	50
3.2 - Níveis de brilho adotados nas paletas SA, SB e SC para representação da declividade em classes	59
3.3 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) adotados nas paletas OC e OC_cor (.smp) para representação da orientação de vertentes classificada em octantes.....	60
3.4 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) das paletas de cores H5 e V5 (.smp) para curvaturas horizontal e vertical	62
3.5 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) da paleta de cores FT (.smp) para formato de terreno.....	64
3.6 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) das paletas DD e DD_pb (.smp) para delineamento de microbacias.....	67
3.7 - Dados para georreferência das folhas estruturadas fora do padrão geral de armazenamento	70

1 INTRODUÇÃO

Desde a disponibilização de dados SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) para a América do Sul, em meados de 2003, há uma grande expectativa com relação aos ganhos de conhecimento sobre nosso território, justificada pela carência geral de dados topográficos em escalas adequadas. Tal perspectiva não será atendida em um ato momentâneo e sim através de um esforço continuado de incorporar as novas informações em estudos que já são conduzidos sem as mesmas. Assim, é importante que esse esforço seja conduzido de forma descentralizada, pelos profissionais que tenham familiaridade com questões relacionadas ao relevo em diferentes localidades. Uma vez que o tratamento de dados topográficos em meio digital, por geoprocessamento, é requisito relativamente recente na rotina dessas especialidades, a elaboração de informações topográficas básicas representa uma condição importante para uma rápida assimilação dos dados SRTM.

No intuito de se acelerar este processo, a iniciativa TOPODATA foi conduzida na forma de projeto para o cálculo e a oferta de variáveis geomorfométricas locais com estes dados por todo o território nacional. Tais variáveis correspondem aos elementos básicos sobre os quais se fundamentam as técnicas de interpretação e análise do relevo. Com base em inúmeros trabalhos na literatura científica, endossados por solicitações igualmente numerosas, o projeto incluiu entre seus produtos as variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal, curvatura vertical e insumos para o delineamento da estrutura de drenagem. Dada sua natureza local, essas variáveis podem ser calculadas em ambiente de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) com qualidade relativamente aceitável e ganhos operacionais absolutos, sobretudo de velocidade e padronização. Dessa forma, a citada iniciativa culmina uma série de desenvolvimentos em busca de metodologias e algoritmos de derivação geomorfométrica, e resulta na geração de um extenso banco de dados estruturado na forma de planos de informação, em cobertura nacional, para livre uso pela comunidade científica.

De nossa situação histórica de carência de mapeamentos topográficos decorre uma relativa falta de tradição no uso de informações do relevo para assuntos com grande potencial de contribuição por estas informações. Não é absurdo, portanto, que benefícios importantes advindos do uso da informação topográfica prescindam de algum traquejo no lidar com a mesma, ainda que se tenham adiantado diversas fases da análise do relevo através da realização de um trabalho prévio de geoprocessamento. Portanto, este documento tem como objetivo orientar o uso dos resultados de análises geomorfométricas dos dados SRTM oferecidos para a comunidade científica.

2 FUNDAMENTOS

2.1 Modelos Digitais de Elevação e dados SRTM

Na forma trivial, modelos digitais de elevação (MDE) são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel. Os registros altimétricos devem ser valores de altitude do relevo, idealmente, para que o MDE seja uma representação da topografia. Embora existam MDE de origens diversas, as curvas de nível constituem uma importante fonte de dados para sua construção. Essencialmente, a construção de MDE com mapas topográficos consiste na digitalização das isolinhas e sua posterior interpolação, quando as altitudes são estimadas ponto a ponto de uma grade regular para seu armazenamento.

Dados topográficos advindos de sensores podem expressar a presença de objetos não topográficos (prédios, casas, árvores) sobre a superfície do terreno, cabendo aqui novas conceituações e decorrentes controvérsias sobre terminologia. Embora não se proponha entrar nesses questionamentos, cabe ressaltar que os dados SRTM são sensíveis a estes efeitos que, por sua vez, podem afetar ocasionalmente o aproveitamento dos dados. Dada a expressão territorial da vegetação como fonte desses efeitos, usaremos aqui a expressão “efeito dossel”, simplesmente. Adicionalmente, as expressões MDE e terreno serão usadas de modo distinto, pois o primeiro é uma representação sujeita a uma série de diferenças em relação ao segundo, incluindo-se efeito dossel, erros e a própria representação simplificada (modelo) da realidade concreta, em células que chamamos de pixels.

Os dados SRTM, na forma em que foram disponibilizados para nosso continente, apresentam resolução horizontal (i.e., resolução espacial) de 3 arco-segundos (~90m) e resolução vertical de 1m. Toda a aquisição dos dados SRTM foi planejada a suprir mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000.

Embora os MDE sejam um insumo fundamental ao conhecimento do relevo, muito de sua utilização numérica recai sobre variáveis derivadas da altimetria, como a declividade, o exemplo mais imediato. No entanto, deve-se lembrar que uso direto da elevação como fator analítico tem grande importância para espacialização de dados de temperatura, bem como estudos que envolvem hidrologia superficial, inundações e processos envolvendo movimentos gravitacionais. Como base para interpretação qualitativa, os dados altimétricos são tradicionalmente aplicados a incontáveis fins.

Muito do exercício de interpretação geomorfológica do relevo foi desenvolvido sobre curvas de nível. Assim, pode-se acrescentar a geração de curvas de nível (onde quer que não existam ou estejam em escalas insuficientes) às aplicações diretas da elevação SRTM. A geração de isolinhas a partir de MDE compreende, em alguma etapa, um fatiamento da elevação nos níveis de interesse, impostos pelo operador. É tentador que se imponham equidistâncias verticais pequenas, ao modo que levantamentos detalhados são feitos, a fim de se oferecerem mais detalhes para sua interpretação. Embora os dados tenham nominalmente uma resolução vertical de 1m, deve-se lembrar de algumas de suas características intrínsecas para o dimensionamento de suas limitações, além das estimativas de acurácia: a resolução espacial e o efeito dossel. Ao contrário do que o senso comum pode sugerir, tais restrições são tanto maiores quanto menores forem as declividades: em terrenos planos, um desnível pequeno pode corresponder a um grande deslocamento horizontal das isolinhas. Essa relação é conhecida e prevista pelos estudiosos da representação cartográfica do relevo (IMHOFF, 1982)

No primeiro caso, deve-se lembrar que os dados foram integrados para uma resolução espacial de 90m antes de sua disponibilização. Portanto, não se deve esperar que o detalhamento vertical possivelmente atingido seja acompanhado de um detalhamento horizontal compatível, por mais que se escolham equidistâncias estreitas. O usuário deve se perguntar sempre: “O que significa uma equidistância vertical de X metros quando a altitude em análise representa uma média de quadrados de 90m de lado?” Assim, torna-se claro o

absurdo de se produzirem isolinhas, por exemplo, de 1 em 1 metro nessas condições. Mesmo após um refinamento para 30m, por exemplo, não se deve esperar resultados aceitáveis com o detalhamento da interpretação das isolinhas acima dos seus limites originais de resolução espacial, de 90m. Os tratamentos aplicados no refinamento desses dados podem favorecer a percepção de feições relativamente detalhadas, mas não garantem o atendimento de critérios planimétricos para o posicionamento acurado nas mesmas escalas de detalhamento.

A baixa amplitude do relevo é uma condição desfavorável à análise de isolinhas por si, porém a sensibilidade ao efeito dossel dos dados SRTM é um severo agravante. Por exemplo, são necessárias duas isolinhas na mesma vertente para que se possa estimar a declividade naquele segmento restrito, 3 isolinhas para a curvatura em perfil, e assim por diante (Figura 2.1). No limite, o ideal seria poder caracterizar vários segmentos de cada vertente, livremente, o que é possível através do próprio MDE, quando este permite. Para a representação de vertentes em relevo de amplitude local de 40m, por exemplo, uma equidistância de 20m faz com que quase todas as vertentes apresentem uma única isolinha, insuficiente para qualquer observação de seus aspectos verticais (amplitude, declividade, curvatura vertical etc.). Nesse caso, interessa criar mais isolinhas, portanto com equidistâncias menores, que se aproximam à amplitude do efeito dossel. Relata-se (KELLNDORFER et al., 2003) que até 80% da altura de dossel foram expressos nos dados SRTM, como acréscimos à altitude do terreno. Por esta relação, variações de 15m na altura de dossel seriam suficientes para criar artefatos totalmente vegetacionais em isolinhas de 10m. Estas são as mais severas limitações para o uso da elevação SRTM, sobretudo nas condições do ambiente amazônico. Nesse bioma, há um predomínio de florestas densas e altas, portanto um efeito dossel extremo, enquanto grande parte do relevo subjacente apresenta pequena amplitude altimétrica. Em poucas palavras, estão combinadas a condição de maior desvio com a maior demanda de exatidão.

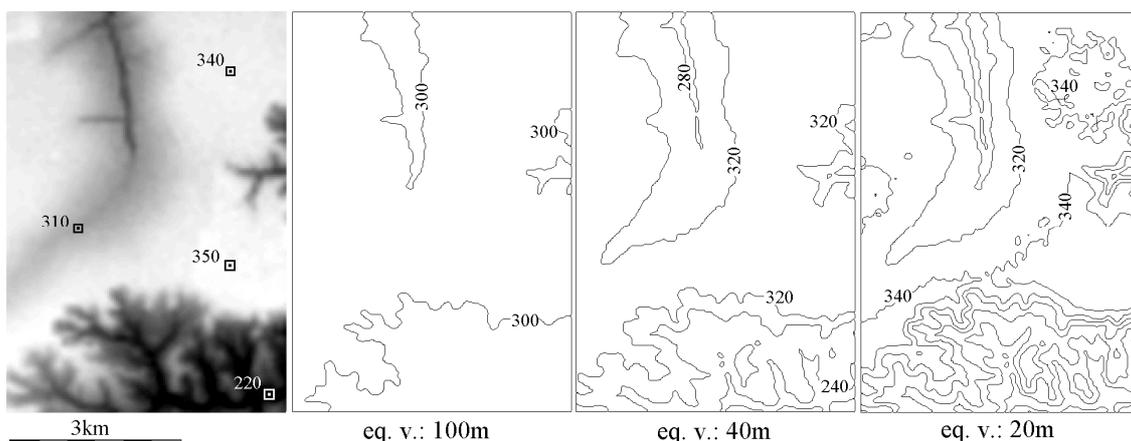


Figura 2.1 - Isolinhas em diferentes eqüidistâncias verticais.

O efeito dossel não é constante. Ele depende das condições da cobertura vegetal em cada local à época do sobrevôo da SRTM (11 a 22 de fevereiro de 2000). Entre essas condições estão variações naturais encontradas na vegetação preservada, tais como composição, arquitetura, status hídrico e biomassa (LE TOAN, 1992). Assim, em áreas de floresta densa, o que se observa nos dados SRTM em detalhe local são variações de efeito dossel misturadas às possíveis variações de curto alcance na topografia. Esta, por sua vez, mostra-se mais perceptível e menos afetada por artefatos nos dados SRTM quando observada sob escalas mais generalizadas, em que não se percebem as pequenas variações de dossel, assim como pequenas feições topográficas.

Uma vez que é pouco provável que se possam mapear as variações do efeito dossel de modo a compensá-lo nos dados SRTM, devemos ter em mente que, além da elevação, derivações geomorfométricas deverão ser afetadas. Em casos evidentes de interferência (bordas de desmatamento, por exemplo), é possível perceber seu efeito e removê-lo através da edição dos resultados finais. Porém, as variações naturais do efeito dossel não se evidenciam nas derivações e, portanto, estes erros representam um prejuízo incontornável da confiabilidade dos resultados.

2.2 Derivações geomorfológicas locais

As variáveis geomorfológicas locais foram obtidas a partir da altimetria, com derivações em torno de cada ponto analisado operadas através de janelas móveis. Assim, além da própria altimetria (derivação de ordem zero), são fornecidas a declividade e a orientação de vertentes (derivadas de 1ª ordem) e as curvaturas vertical e horizontal (derivadas de 2ª ordem) como principais variáveis geomorfológicas locais (Figura 2.2).

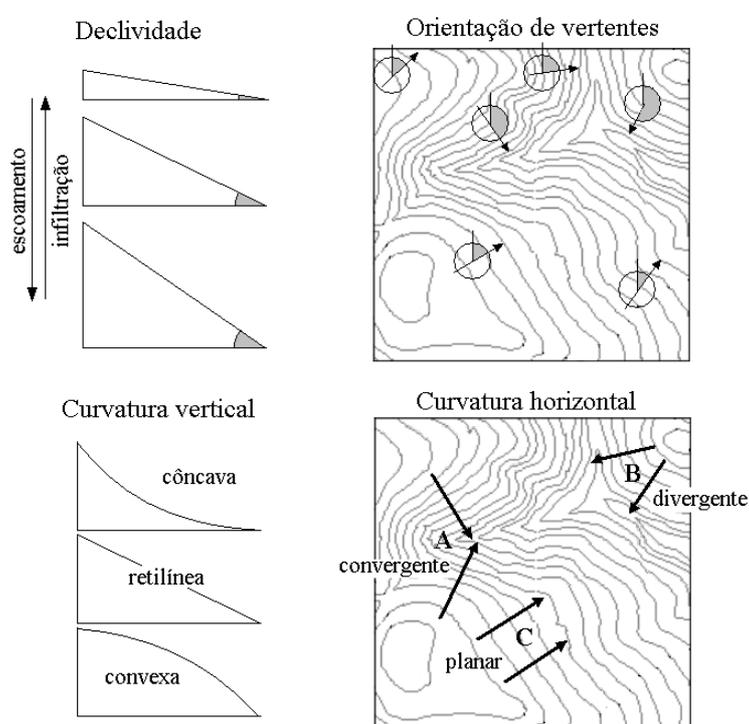


Figura 2.2 - Variáveis geomorfológicas locais derivadas da altimetria.

As mesmas foram classificadas e combinadas para a produção de mapas de intervalos e qualitativos, tais como classes de declividade e formas de terreno. Embora não se configure uma variável numérica, o delineamento de canais de drenagem e divisores de água também foi obtido, baseado em derivação (2ª ordem) da altimetria, através da detecção de pontos notáveis (mínimos e máximos) de transectos topográficos.

2.2.1 Declividade

Devido à sua estreita associação com processos de transporte gravitacional (escoamento, erosão, deslizamento), a declividade do terreno é uma variável básica para a segmentação de áreas em praticamente todos os procedimentos de planejamento territorial. Podemos dizer que todos os métodos de avaliação de terras ou planejamento conservacionista, baseados em modelagem numérica ou em decisões lógicas, lidam com a variável declividade. Além dessas aplicações, também figura entre as variáveis de evidente aplicação na interpretação geomorfológica.

A declividade é definida como o ângulo de inclinação (zenital) da superfície do terreno em relação à horizontal (Figura 2.2). Seus valores podem variar de 0° a 90° , embora seja mais comumente expressa em porcentagem, de zero a infinito. Em campo, sua medição direta pode ser feita com clinômetro, cuja leitura é feita com uma visada entre dois pontos de um alinhamento na mesma orientação da vertente local. Indiretamente, pode-se computar desníveis em visadas horizontais, e calcular o ângulo operando-se os mesmos com suas respectivas distâncias. Em mapas topográficos, é estimada pela distância entre as curvas de nível. Em MDE, sua estimativa se baseia na análise dos desníveis entre pixels vizinhos. Uma série de termos pode fazer referência à função de SIG para sua estimativa, podendo-se listar: *slope*, *slope angle*, *gradient*, *steepness* e *directional derivatives*. Como indicam as metodologias para seu cálculo, a declividade é a primeira derivada da elevação em relação à distância horizontal.

Decorre de sua natureza diferencial que seu cálculo deve ser sempre considerado uma estimativa, uma vez que tal cálculo depende do intervalo de derivação. Em outras palavras, o cálculo de declividade será sempre o resultado de um diferencial altimétrico entre vizinhos e, portanto, dependente da distância considerada. Reduzindo esta distância a um limite impraticável (centímetros, por exemplo), teremos estimativas de micro-relevo, mais associadas à rugosidade do solo do que à topografia em si. Reciprocamente,

aumentando-se esta distância, tendemos a observar as tendências gerais do relevo, com uma previsível perda na percepção de variações locais. No caso dos MDE, as distâncias de derivação correspondem a um pixel (ou dois, conforme o cálculo específico) em sua resolução espacial. Como efeito do intervalo de derivação, desenvolvimentos anteriores (VALERIANO, 2002) mostraram que resoluções fracas tendem a causar subestimativa e baixa correlação quando comparados a medidas cartográficas de controle, tomadas na escala de 1:20.000. Portanto, seu cálculo, dentro de limites razoáveis, é favorecido por alta resolução espacial, um dos motivos para se fazer o refinamento dos dados SRTM. Os mesmos estudos relatam outras particularidades de sua estimativa por geoprocessamento que devem ser levados em conta quando de sua utilização:

- a) A declividade apresenta grande variabilidade espacial quando comparada à altitude: é corriqueiro haver grandes mudanças de declividade em curtas distâncias horizontais.
- b) A distribuição das declividades locais de uma área sempre se concentra em valores baixos; há sempre uma raridade relativa de declividades altas.
- c) Os locais de declividade alta são normalmente áreas pequenas e dissociadas de sua vizinhança, enquanto que áreas de declividades baixas tendem a formar grandes manchas, mais coesas, no terreno.
- d) A estimativa de declividades altas tende a mostrar maiores desvios (erros) relativos ao controle.

A natureza diferencial é responsável pelo efeito de grande detalhamento geométrico dos resultados de declividade, conforme previsto na teoria, pois as derivadas têm a propriedade de apresentar mais feições do que suas funções (curvas) de origem. Ao longo do transecto da Figura 2.3, oito pontos de máximo na altimetria corresponderam a treze pontos de máximo na declividade.

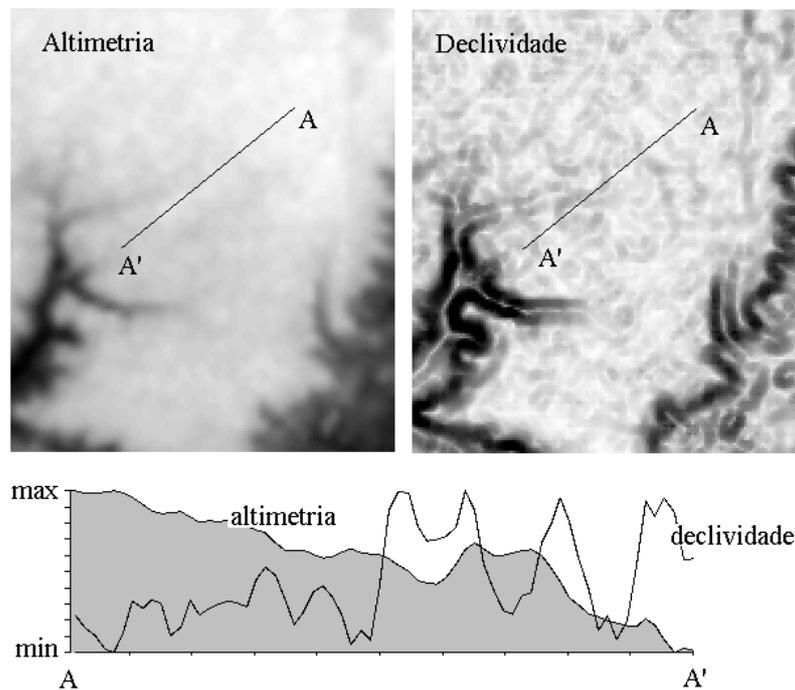


Figura 2.3 - Detalhamento geométrico da declividade em relação à altimetria.

Essa característica (a) desfavorece sua integração em grandes áreas, anulando o significado da adoção de um único valor para cada pixel em baixa resolução. Em áreas planas, um valor de declividade média pode ser representativo das ocorrências dentro de um grande pixel. Porém, em áreas de declividade variada, as características b e c fazem com que a integração dos valores tenda a resultar em pouca representatividade (e em subestimativa) dos valores ocorridos, tanto mais intensamente quanto maior for a área de integração. A decorrente dificuldade de se representar numericamente a declividade em escalas generalizadas restringe seu uso analítico a abordagens locais. Para escalas menores, recomenda-se que se trabalhe com classes definidas em função dos diferentes padrões de sua distribuição.

Ainda que se trabalhe em detalhe, a prática mostra que alguma suavização pode ser benéfica, como forma de atenuar a excessiva variação, que com frequência se apresenta indesejavelmente ruidosa. Testes sobre MDE krigados (na mesma técnica com que foram refinados os dados SRTM) mostraram que a

suavização por filtros de média traz vantagens após o cálculo da declividade e desvantagens quando aplicado antes, sobre o MDE. A filtragem média dos resultados de declividade reduz a dispersão em relação aos dados de controle, aumentando assim a correlação. Como efeitos indesejáveis, há uma redução dos máximos locais de declividade (conseqüência da observação c, acima) e da sensibilidade da relação estimativa-controle. O cálculo da declividade sobre os dados SRTM passou por uma suavização criteriosa, acompanhada de alguns cuidados para contornar ambas desvantagens. Para o primeiro efeito, as declividades mais altas foram repostas com ponderação crescente em função da declividade, preservando-se assim os valores originais das declividades mais altas. A partir de 20%, todos os valores estimados foram preservados. A redução da sensibilidade foi simplesmente compensada através da transformação linear (ajuste) observada em relação ao controle.

Ainda assim, não se deve esperar uma confiabilidade absoluta das estimativas de SIG da declividade, sobretudo nos intervalos mais altos da variável. O coeficiente de determinação máximo atingido nos testes com controle foi de 65%, através de uma abordagem vetorial (VALERIANO, 2002b) para a estimativa. Simplificando, pode-se dizer que aproximadamente 2/3 da variação da declividade estimada foi explicada pela declividade medida, enquanto 1/3 de sua variação esteve dissociado das medições tomadas manualmente sobre os dados de entrada.

É importante ressaltar que toda operação aritmética entre ângulos de declividade deve ser feita com a variável expressa em graus, radianos ou grados, por estas serem unidades lineares e proporcionais. Os valores em porcentagem variam de forma não-linear, de modo que setores com mesma abertura correspondem a intervalos numéricos diferentes, de acordo com sua posição no arco trigonométrico. Por exemplo, não se pode dizer que 2 vezes o ângulo de 100% corresponde a 200%, pois 100% é 45° e 200% não é 90°. Portanto, todo trabalho de filtragem (que é uma série de aplicações locais do cálculo de média) dos dados de declividade deve atender esta condição. No

caso das derivações dos dados SRTM, os resultados das operações, feitas em radianos, foram re-convertidos para porcentagem a posteriori.

Embora os valores de declividade sejam muito requeridos em trabalhos de análise numérica, modelagem e outros usos matemáticos, é preciso reconhecer uma forte tradição de uso de classes de declividade em abordagens lógicas. As faixas de declividade são utilizadas nos instrumentos formais de avaliação de terras, como o Sistema de Capacidade de Uso ou Aptidão Agrícola, entre outros. Diversos procedimentos de análise do relevo incluem a classificação da área em faixas de declividade, para posterior integração com outros planos de informação. Na Tabela 2.1 estão apresentados os limites de declividade de acordo com o Manual Brasileiro para Levantamento da Capacidade de Uso (MARQUES, 1971), atualizado em Lepsch et al. (1991), assim como a atual classificação da EMBRAPA (1999).

A geração de mapas com essas classes também incluiu cuidados advindos das observações sobre a estimativa de declividade. A operação de fatiamento (ou reclassificação) evidencia o excessivo detalhamento dado pela variabilidade espacial da declividade (a), na forma de limites ruidosos entre as classes e presença excessiva de manchas diminutas de declividade. Da mesma forma que os dados numéricos, uma suavização do mapa de classes de declividade mostrou-se desejável. No caso de classes, a suavização foi operada mediante a aplicação de filtros de moda, que promovem a coesão das manchas mapeadas em função da classe localmente majoritária. As características b e c listadas acima foram corroboradas com uma relativa supressão das pequenas manchas que representam a totalidade das ocorrências das classes mais altas. Para preservar os registros de altas declividades, raros e esparsos, foi feita a reposição de todas as ocorrências originais de classes acima de 20%, independente de sua área, após a filtragem moda.

Tabela 2.1 - Comparação entre diferentes limites rígidos de classes de declividade para avaliação de terras

Marques (1971)		Lepsch (1991)		EMBRAPA (1999)	
Declive	Faixa (%)	Classe	Faixa (%)	Relevo	Faixa (%)
A – suave	0 a 2,5	A	0 a 2	Plano	0 a 3
		B	2 a 5		
B – moderado	2,5 a 12	C	5 a 10	Suave ondulado	3 a 8
		D	10 a 15		
C – forte	12 a 50	E	15 a 45	Ondulado	8 a 20
		F	45 a 70		
D – muito forte	Acima de 50	G	Acima de 70	Montanhoso	45 a 75

2.2.2 Orientação de vertentes

A orientação de vertentes (também chamada exposição ou direção) é definida como o ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno, no sentido descendente. É expressa em graus, de 0° a 360° (Figura 2.2). Em campo, é determinada pela leitura da bússola em visada na direção presumida do escoamento, ou simplesmente, morro abaixo. Em mapas topográficos, a orientação é dada pela direção transversal à isolinha local e no sentido descendente. A orientação de vertentes compõe, com a declividade, a geometria de exposição da superfície do terreno em representações sob esquema de relevo sombreado. Devido a esta aplicação, em SIG, a função para seu mapeamento costuma se apresentar sob o nome aspecto (*aspect*),

embora se encontre ainda *slope direction* ou simplesmente *direction* como termos usuais na literatura.

Como os ângulos zenital e azimutal da superfície, respectivamente, a declividade e a orientação de vertentes guardam entre si uma relação de analogia e complementaridade na descrição tridimensional do terreno. Porém, há uma outra relação funcional entre as duas variáveis, quando observamos a ação do relevo em projeção horizontal; a respeito dos deslocamentos oriundos de processos de transporte gravitacional, podemos dizer que a orientação de vertentes é a direção do vetor cujo módulo corresponde à declividade. Em relevos planos sua determinação é difícil e mesmo sem significado, uma vez que nessa situação o módulo da declividade é nulo ou quase nulo. Assim, deve-se ponderar a orientação de vertentes pela declividade local em todo mecanismo que se traduza em um vetor no plano horizontal. Num exemplo extremo, o resultado do cálculo da orientação em áreas planas ou quase planas deve ser tomado como um erro ou fruto de flutuações (desníveis) desprezíveis. Coerentemente, em nossa vivência, observamos a formação de várias poças d'água em áreas planas (aeroportos, estacionamentos), numa clara indicação de que o escoamento superficial não encontra um padrão consistente de orientação ao longo do fraco gradiente.

Na Figura 2.4, o mapa altimétrico permite observar um patamar ao centro da área apresentada. Este tem declividades baixas, conforme indicado pela classe "plano" (branco) na classificação da EMBRAPA (1999). Observa-se, na área plana, que as orientações de vertentes variam em padrão desorganizado, sugerindo uma extrema granulação da superfície. Nas demais áreas, o sombreamento produzido sugere uma estrutura coerente com o relevo, com realce de canais de drenagem e divisores de água. Enquanto a orientação de vertentes tem muitas utilidades em áreas inclinadas, nesta situação, em áreas planas, sua leitura deve ser desconsiderada. Muitos SIG oferecem a opção de se estabelecer um limite mínimo de declividade para o cálculo da orientação de vertentes. No caso de pixels em áreas assim definidas como planas, o

resultado seria um valor externo à sua faixa de variação (-1° ou 361° , por exemplo).

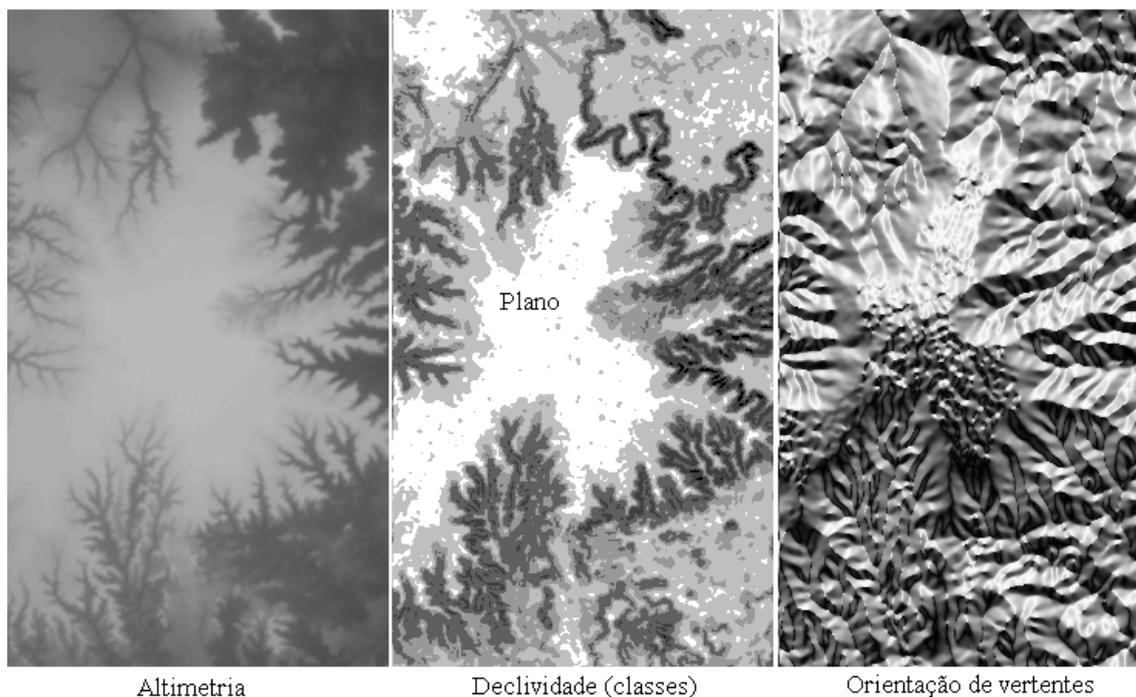


Figura 2.4 - Desorganização da orientação de vertentes em áreas planas.

Por caracterizar a direção de exposição do terreno, a orientação de vertentes é diretamente aplicada em diversas funções relacionadas à geometria da superfície. Em agricultura, este aspecto é associado ao balanço de radiação, sobretudo em áreas de alta latitude. Nesta condição, as vertentes orientadas para o Equador recebem mais radiação solar, com evidente efeito sobre os regimes térmico e hídrico. Daí se considera seu valor para o planejamento de atividades agrícolas, da distribuição das culturas à previsão e ao planejamento de colheitas. Em reciprocidade ao cálculo da energia solar incidente, técnicas para a redução do efeito topográfico sobre imagens multispectrais (FAHSI et al., 2000) são igualmente baseadas em combinações trigonométricas entre os ângulos da superfície (declividade e orientação de vertente) e os ângulos (zenital e azimutal) de iluminação solar. Tomando-se a variável em escala regionalizada, há também implicações sobre a distribuição de precipitação

devido à anisotropia dos mecanismos que atuam na formação de chuva orográfica.

Apesar das importantes aplicações citadas, a principal utilização da orientação de vertentes em geoprocessamento advém de seu poder de descrição da estrutura de hidrologia superficial. A seqüência de pontos (pixels) alinhados pela orientação de vertentes determina um caminhamento esperado de escoamento que se costuma chamar de linhas de fluxo. As linhas de fluxo, canais de drenagem e divisores de água podem ser definidos em função do arranjo local de diferentes orientações, o que fica prontamente visível em representações adequadas da variável. Assim, o delineamento de microbacias pode ser altamente favorecido quando feito com apoio da orientação de vertentes. Avançando das etapas descritivas, o desenho das linhas de fluxo subsidia a modelagem de todo processo de transporte ao longo das vertentes.

Eventualmente, pode ser de interesse o tratamento numérico da orientação de vertentes, para variadas finalidades: modelagem, estatística, tratamento de imagem etc. Nesse caso, deve-se lembrar que a orientação de vertentes é uma variável circular e, portanto, merecedora de uma série de cuidados para sua operação. Não é admissível calcular médias para direções operando seus valores em graus, sob risco de se causarem inversões entre outros resultados inusitados. A média aritmética dos ângulos de duas direções em torno do Norte (por exemplo, 350° e 10°) resulta em um valor correspondente a uma direção próxima a Sul. Esse erro é sempre cometido quando se aplicam filtros de média sobre orientação de vertentes. Além dessas limitações aritméticas, as relações expressas em inequações (“maior” ou “menor”) ficam sem significado.

Uma alternativa para contornar a circularidade em ambas situações é decompor os ângulos em seno e cosseno. As operações aritméticas que se fizerem necessárias podem ser aplicadas a essas componentes e o ângulo resultante pode ser recomposto (arco-tangente de seno/cosseno) após as operações. A decomposição também permite o estabelecimento de inequações ou outras formas de comparação, uma vez que as componentes são lineares. No caso de se estimar a exposição do terreno a uma dada direção, o cosseno

da orientação relativa a essa direção expressa esse fator de -1 a 1 . No exemplo mais trivial, temos o cosseno da orientação de vertentes como indicador de “o quão para o Norte” está exposta. Assim, vertentes orientadas exatamente para o norte apresentam cosseno igual a 1 . Reciprocamente, vertentes para o Sul terão valor -1 e vertentes “neutras” (Leste ou Oeste) terão valor nulo. Analogamente, o seno representa “o quão para Leste” está orientada a vertente. Em função de algum fenômeno direcional específico (ventos, focos de fogo, poluição ou influência marítima, por exemplo) a direção de referência pode ser deslocada do Norte convencional e os cossenos calculados dos novos ângulos representarão a exposição da vertente a esses fatores.

2.2.3 Curvatura vertical

A curvatura vertical expressa o formato da vertente quando observada em perfil. É definida com a segunda derivada da altitude, o que pode ser descrito como a variação da declividade ao longo de uma determinada distância. Traduzindo tais definições para a percepção comum, refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, quando analisado em perfil (Figura 2.2). É expressa em diferença de ângulo dividida por distância horizontal, o que pode assumir diferentes unidades. Na forma explícita, pode ser expressa em graus por metro. Uma vez que ângulos podem ter expressão adimensional (m/m, como em radianos), alguns autores a apresentam formalmente em m^{-1} .

A percepção da curvatura vertical do terreno no campo, quando não ocorre visualmente (em perfil), se dá pela variação da declividade enquanto se percorre a vertente em sua orientação (direção do desnível). A medição da curvatura vertical em cartas topográficas requer a leitura de pelo menos 3 curvas de nível adjacentes e, analogamente à percepção no terreno, é indicada pela progressiva aproximação (ou afastamento) das curvas de nível ao longo das vertentes. Em SIG, seu cálculo é baseado na comparação entre

diferenciais altimétricos recíprocos ao ponto (pixel) sob análise, feita através de janelas móveis.

Curvaturas nulas correspondem a retas. Portanto as curvaturas se caracterizam por apresentar valores positivos e negativos, dependendo da condição local, se côncava ou convexa. Assim os valores de curvatura podem, teoricamente, variar de menos infinito a mais infinito. Na prática, as formas de representação do relevo não são capazes de registrar tal amplitude, uma vez que, nas dimensões praticáveis em estudos de topografia, as distâncias horizontais são grandes em relação às possíveis variações de declividade.

Devido à forte relação com o tipo de substrato e com processos de formação do relevo, os estudos de compartimentação da topografia apontam a curvatura vertical como uma variável de alto poder de identificação de unidades homogêneas para mapeamentos diversos. Com relação a processos atuais, esta variável está relacionada aos processos de migração e acúmulo de matéria através da superfície (sobretudo água), proporcionados pela gravidade. Por este mecanismo, atua indiretamente no equilíbrio entre os processo de pedogênese/morfogênese, além de influenciar a distribuição local do regime hídrico e, conseqüentemente, o regime térmico. Seja por sua atuação presente ou pretérita, a distribuição da curvatura vertical apresenta forte relação com mapas pedológicos e geológicos.

A transformação da curvatura calculada em classes (convexo, côncavo e retilíneo) é feita através do fatiamento (ou reclassificação) dos valores obtidos. Teoricamente, valores positivos devem corresponder a terrenos convexos, negativos a terrenos côncavos (ou vice-versa) enquanto valores nulos indicam vertentes retilíneas. Na prática, a ocorrência de valores nulos fica sendo uma coincidência raríssima, uma vez que desníveis recíprocos ao ponto em estudo teriam que ser idênticos para tal condição. Portanto, há a necessidade de se admitir uma margem de valores em torno do zero para que as vertentes retilíneas possam ser evidenciadas. Ensaio comparativos com descrições geomorfológicas levaram ao estabelecimento da faixa entre $-0,010^{\circ}/m$ e $+0,010^{\circ}/m$ como valores de curvatura típicos de vertentes tidas como retilíneas.

Esses foram os limites aplicados na classificação da curvatura vertical em vertentes côncavas, retilíneas e convexas. Um segundo esquema de classificação pode ser aplicado à curvatura vertical para seu agrupamento em 5 classes (Figura 2.5). Com maior número de classes, estreita-se a faixa de admissão na classe retilínea ($\pm 0,00125^{\circ}/m$), para a evidenciação de concavidades/convexidades moderadas, até $\pm 0,005^{\circ}/m$, quando a curvatura se torna franca. Os limites estabelecidos para essa classificação foram baseados em numerosas aplicações e repetidas atualizações, em função da crescente área em que foram testados.

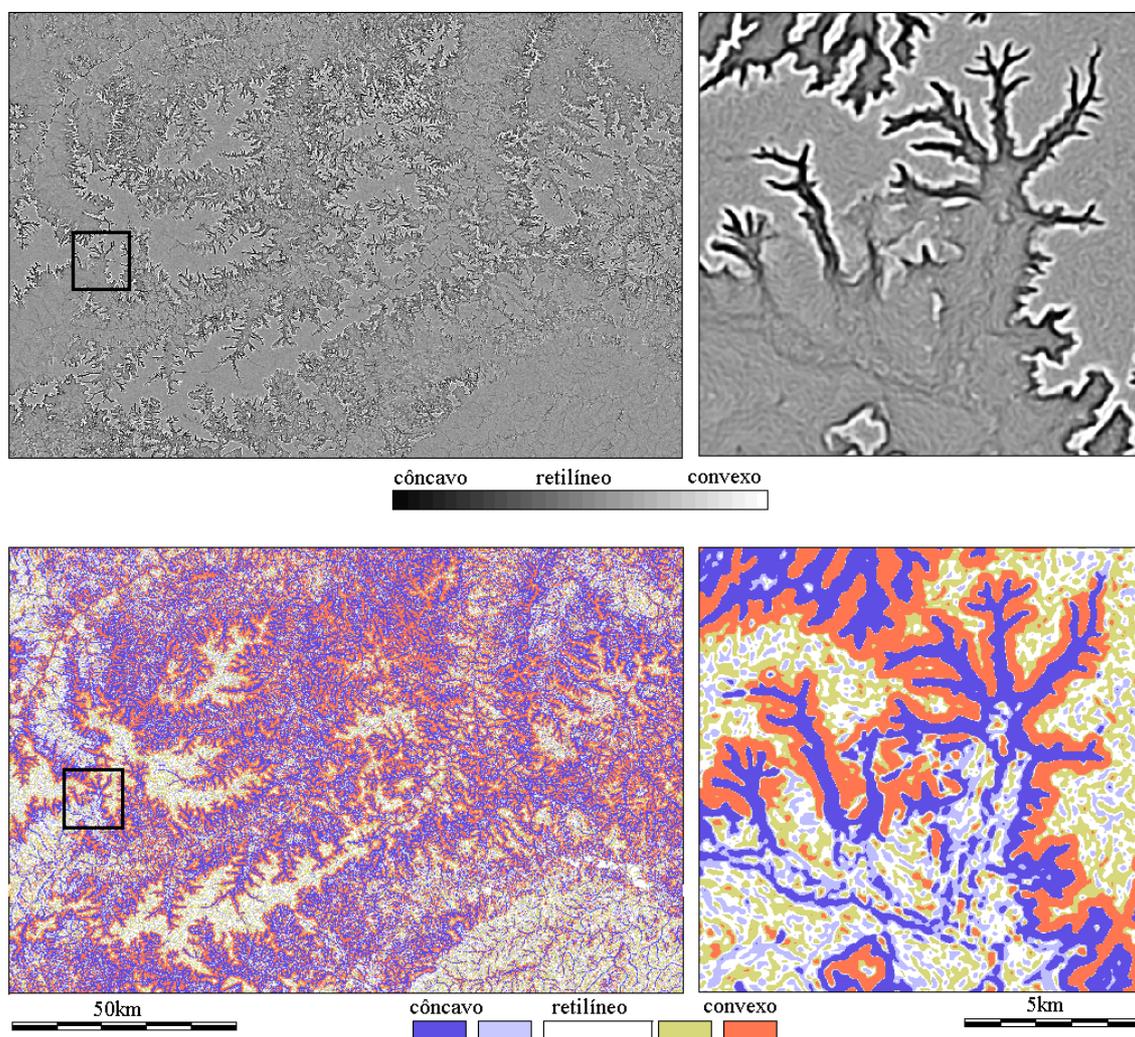


Figura 2.5 - Curvatura vertical na forma numérica (acima) e em 5 classes (abaixo).

A representação de resultados de curvatura vertical de dados SRTM sobre diversas condições de relevo natural, na forma numérica ou em classes, permitiu a observação de algumas características da variável. A distribuição numérica concentra-se fortemente em torno de valores nulos, indicando formas retilíneas como padrão e curvaturas como singularidades. Sua distribuição em áreas de relevo movimentado apresenta apenas uma variância ligeiramente maior do que a de áreas de relevo mais suave. A distribuição espacial apresenta uma organização estruturada de tal forma que é possível a percepção de feições em variadas escalas: as curvaturas mais fortes, freqüentemente, delimitam patamares e planícies de maneira bem evidente, enquanto variações moderadas indicam diferenças entre essas grandes feições. As transições entre compartimentos altimétricos mostram-se perfeitamente caracterizadas em arestas, curvas ou gradientes, assim como o entalhamento de canais de drenagem. Outra feição prontamente evidenciada pela curvatura vertical é a inflexão entre relevos positivos e negativos.

2.2.4 Curvatura horizontal

A curvatura horizontal expressa o formato da vertente quando observada em projeção horizontal. É também definida como uma derivada de segunda ordem, porém, não da elevação, mas das curvas de nível. Em analogia à relação entre curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal pode ser descrita como a variação da orientação de vertentes ao longo de uma determinada distância. Na nossa percepção comum, a curvatura horizontal se traduz no caráter de divergência ou convergência das linhas de fluxo (Figura 2.2). É expressa em diferença de ângulo dividida por distância horizontal, normalmente graus por metro ou em m^{-1} .

A percepção da curvatura horizontal no campo requer a possibilidade de ampla visualização nas direções em nível, para que se possa discernir a situação local como de exposição aberta (divergente) ou em anfiteatro (convergente).

Alternativamente, ao percorrermos uma curva de nível, podemos perceber a situação de divergência se o lado interno da curva apontar a montante e vice-versa. A expressão da curvatura horizontal em cartas topográficas está prontamente visível nas curvas de nível e sua medida pode ser feita diretamente sobre as mesmas. Em SIG, seu cálculo é baseado na comparação entre as orientações de vertente na vizinhança do ponto (pixel) medido, através de janelas móveis. Quando a orientação de vertentes da vizinhança for homogênea, haverá a tendência dessa comparação resultar em valores baixos ou nulos, então a vertente é considerada planar. A representação numérica da curvatura vertical inclui o sinal para a distinção entre a situação de convergência e a de divergência. Nos processamentos aplicados aos dados SRTM, o sinal negativo foi adotado para convergência e positivo para divergência.

Esta variável está relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade. Analogamente à curvatura vertical, desempenha papel importante sobre o balanço hídrico e o equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese. Como medida de concentração do escoamento superficial, é uma variável importante também para a compreensão de problemas urbanos ligados ao posicionamento de estruturas de drenagem e mapeamento das possíveis áreas de alagamento. Pelas mesmas razões, representações da curvatura horizontal, em escalas de cinza ou coloridas, mostram-se bastante útil como base pictórica para interpretação de canais de drenagem e divisores de água. Tais feições são prontamente evidenciadas como máximos e mínimos locais, e seu traçado pode ser diretamente decalcado de tais representações (Figura 2.6).

Da mesma forma que para curvaturas verticais, é necessário se estabelecer uma faixa de valores admitidos como nulos para a classificação das vertentes planares. Testes para a classificação em três tipos (convergente, planar e divergente), baseados na comparação com as próprias isolinhas usadas na construção do MDE, levaram a se admitir o intervalo de $-0,038$ °/m a $+0,051$ °/m

como terrenos planares. O esquema de 5 classes foi estabelecido com a faixa de $\pm 0,054^\circ/m$ para terrenos planares, com curvaturas moderadas até $\pm 0,180^\circ/m$.

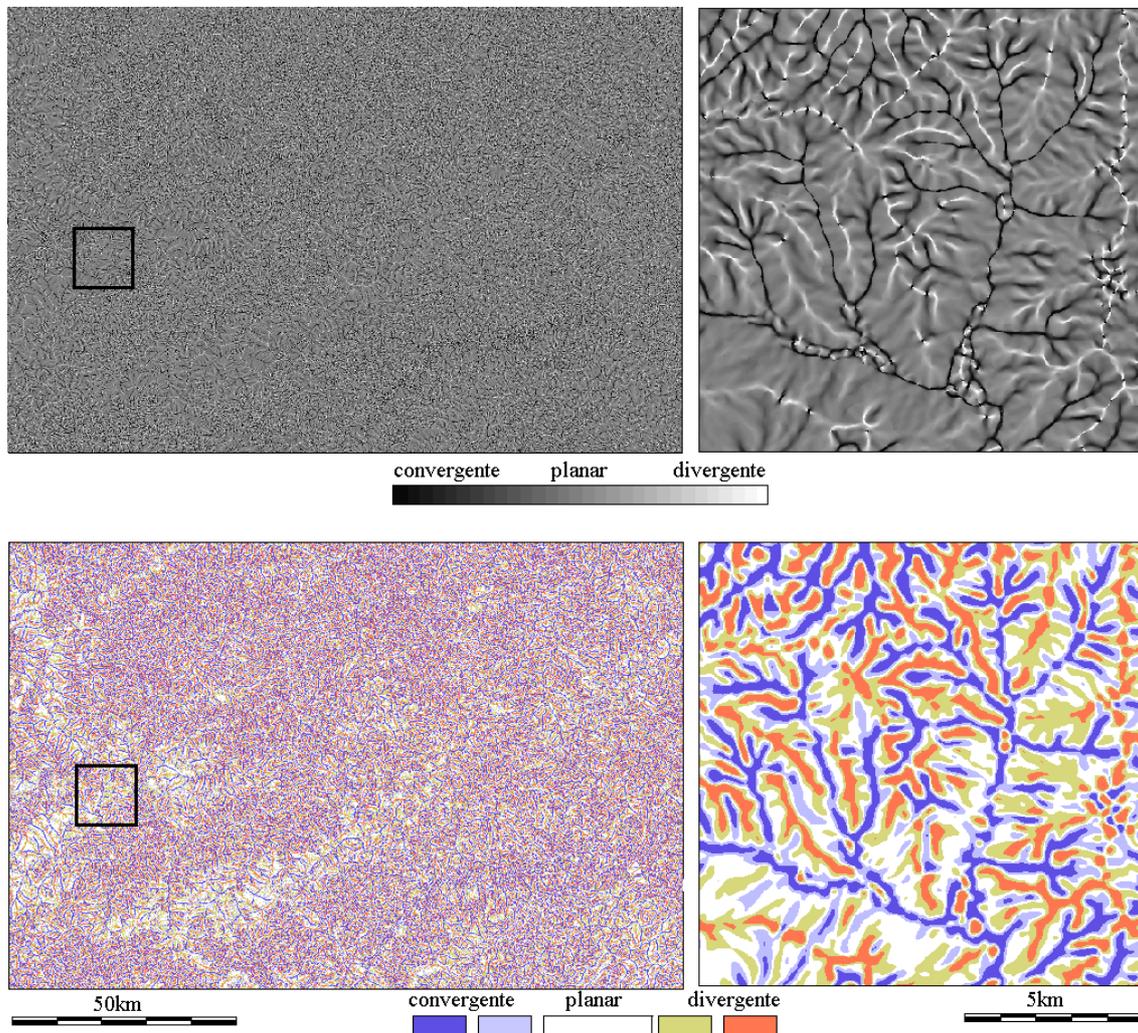


Figura 2.6 - Curvatura horizontal na forma numérica (acima) e em 5 classes (abaixo).

Observações sobre mapas de curvatura horizontal mostraram algumas características com implicações importantes para a aplicação da variável. A distribuição numérica da curvatura horizontal concentra-se fortemente em torno de valores nulos, corroborando o padrão de formas retilíneas com curvaturas como singularidades. A distribuição espacial se apresenta com notável

detalhamento, uma vez que cada vertente compreende toda a gama possível de curvaturas horizontais, de um extremo a outro. Áreas convergentes e divergentes dispõem-se intercaladas entre si, em curtas distâncias. Conseqüentemente, não há diferenças nas distribuições estatísticas da variável entre áreas de relevos distintos. Analogamente, a distribuição espacial desfavorece a representação da variável em escalas generalizadas, que tendem a apresentar um padrão homogêneo, com exceção de ocasionais vertentes de grande comprimento. Tal característica restringe sua utilização a escalas de detalhadas, em que se mostra uma variável de alto poder para informações hidrológicas.

2.2.5 Forma do Terreno

As classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncava, retilínea ou convexa) podem ser combinadas para fornecer indicação da forma do terreno (Figura 2.7).

		Curvatura horizontal		
		convergente	planar	divergente
Curvatura vertical	côncava			
	retilínea			
	convexa			

Figura 2.7 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.

Fonte : Adaptada de Dikau (1990).

Diante do interesse específico do estudo e das condições locais de terreno, substrato e processos vigentes, as classes de forma de terreno podem ser

reagrupadas em função de sua similaridade frente a esses aspectos. Os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento). As combinações intermediárias têm características hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades (módulos) dos efeitos individuais.

2.2.6 Delineamento de microbacias

Entre as derivações preconizadas para o banco de dados geomorfométricos está o produto ora chamado de ADD (Azimute, Divisores e Drenagem). Este se constitui de um delineamento dos canais de drenagem e divisores de água. O delineamento destas feições foi assim baseado na derivação da forma de seções transversais, em que se buscam mínimos (drenagem) e máximos (divisores) locais. Apresenta-se abaixo (Figura 2.8) um modelo da elevação acompanhado de uma amostra correspondente de resultado do processo ADD. O método ADD é um processo simples, sujeito a imperfeições, porém rápido e robusto do ponto de vista da estabilidade dos resultados. Por esta razão, este produto deve ser tomado como uma simples evidenciação dessas feições, na forma de uma imagem (*raster*) em que estes pontos são realçados em classes distintas. O sombreamento subjacente, dado pela orientação de vertentes, torna-se importante como apoio à interpretação necessária para a rejeição, complementação ou retificação das feições evidenciadas pela derivação.

O produto ADD pode atender diretamente a interpretação visual das principais características associadas aos padrões drenagem (densidade, estrutura etc.). No entanto, o produto final desejado para um grande número de aplicações é um conjunto de vetores poligonais das bacias e vetores lineares dos segmentos de drenagem, funcionalmente concatenados. Espera-se ainda que os vetores de drenagens constituam redes, conectadas, juntamente com uma série de condições pelas quais qualificamos a estrutura como "coerente" e "funcional". Embora longe de atender a esta condição, esta derivação permite a

pronta interpretação da provável rede e sua digitalização em vetor. Propõe-se adiantar, desta forma, a fotoleitura das feições, restando ao intérprete o desenho final dos vetores que, propositalmente, serão coerentes e funcionais.

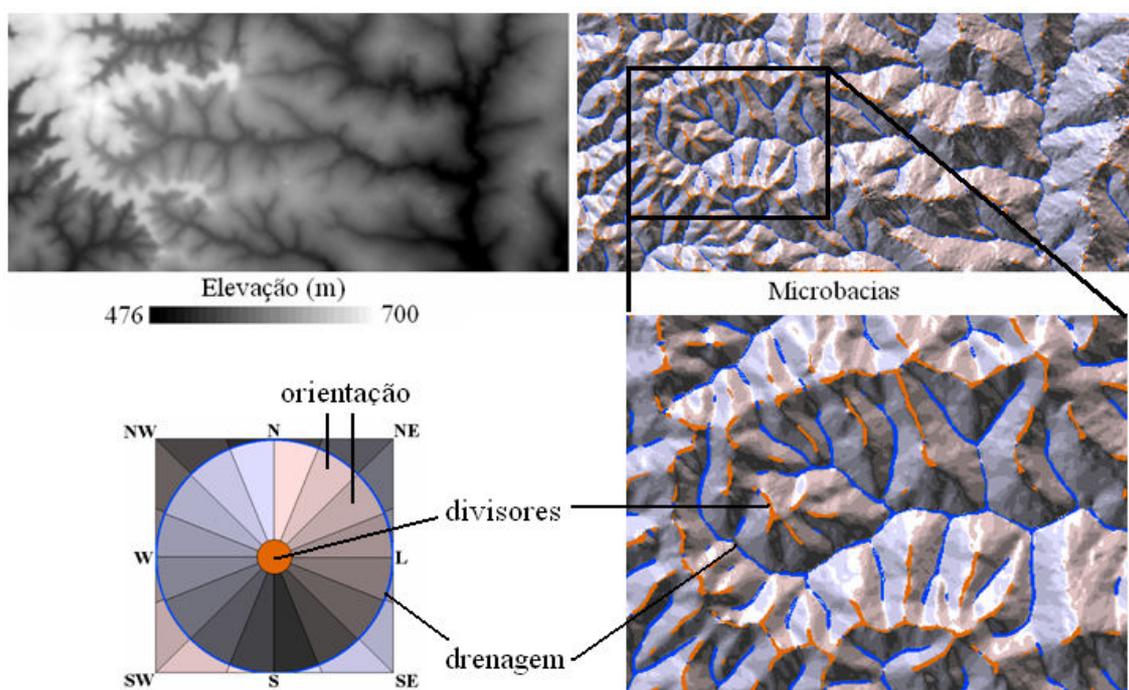


Figura 2.8 - Evidenciação da estrutura de drenagem através do processo ADD.

Deve-se ter em mente as limitações do delineamento de feições de drenagem baseado em MDE. Há uma variedade de abordagens para o problema de derivação altimétrica de canais de drenagem, motivo pelo qual existem diferentes algoritmos para a tarefa. Cada método responde por vantagens e desvantagens em relação aos demais. Há, porém, condições desfavoráveis em que todos métodos falham, mais do que pelo seu próprio desempenho, pelas características do MDE ou do próprio relevo. Pode-se resumir a questão no fato de que nem toda drenagem apresenta manifestação no relevo (ainda menos no que os MDE registram) e, reciprocamente, nem todo canal presente no relevo corresponde um curso d'água. Uma das falhas mais relatadas nos resultados desses processos refere-se ao realce de grandes rios. É também uma falha previsível, uma vez que a expressão topográfica de uma superfície de água é a

mesma de um terreno plano, além do fato de que grandes rios são com frequência ladeados por planícies aluviais. Se lembrarmos que os grandes rios são mais facilmente encontrados em mapas, mesmo que em escalas pequenas, ou são passíveis de observação em imagens óticas (Landsat, CBERS), o problema se torna uma limitação menor.

Para o mapeamento da drenagem de grandes extensões, sugere-se uma abordagem mista, com o uso de mapas, imageamento ótico e enfim derivação dos dados SRTM. Recomenda-se que se inicie a digitalização das drenagens registradas em mapas de qualidade conhecida, para que se mantenha o padrão de posicionamento dos cursos d'água já mapeados. Com uma imagem ótica, pode-se fazer um refinamento das formas e dos detalhes não atingidos na escala dos mapas existentes, além de se avançar no registro de cursos d'água de menor ordem do que os já mapeados. As características espectrais da água, do solo e da vegetação sugerem que imagens da faixa do infravermelho médio sejam adequadas para a maioria das situações, podendo-se esperar também contrastes na faixa do infravermelho, de acordo com o arranjo e com as condições da vegetação ribeirinha. Muitas vezes, a presença de cursos d'água é denunciada justamente pela presença de mata ciliar. Esgotadas as contribuições advindas do imageamento ótico, o delineamento de talvegues sobre dados SRTM pode adicionar canais de menor ordem à rede traçada até então.

Experimentações práticas mostraram que o traçado final da rede de drenagem e das microbacias sobre os dados SRTM deve ser atingido após uma sucessão de aproximações. Para que os dados sejam aproveitados ao máximo de sua precisão, ao mesmo tempo em que se minimizam erros, recomenda-se que se adote uma abordagem que convirja progressivamente de escalas mais gerais para o detalhamento, de acordo com a marcha operacional descrita a seguir.

Inicialmente, um primeiro esboço (vetorial) dos divisores de água das grandes microbacias deve ser traçado sobre representações da altitude. A observação alternada entre as representações em nível de cinza e em relevo sombreado pode favorecer a decisão em casos de alguma dúvida, porém não se deve ir

além de um esboço nesta etapa. Ampliando-se as microbacias uma a uma, podem ser traçados os divisores internos que estiverem evidentes, por segurança. O objetivo da etapa de esboço dos divisores é unicamente isolar os canais de microbacias diferentes. Em seguida, estes vetores podem ser sobrepostos à representação ADD para o primeiro traçado em esboço da rede de drenagem (Figura 2.9).

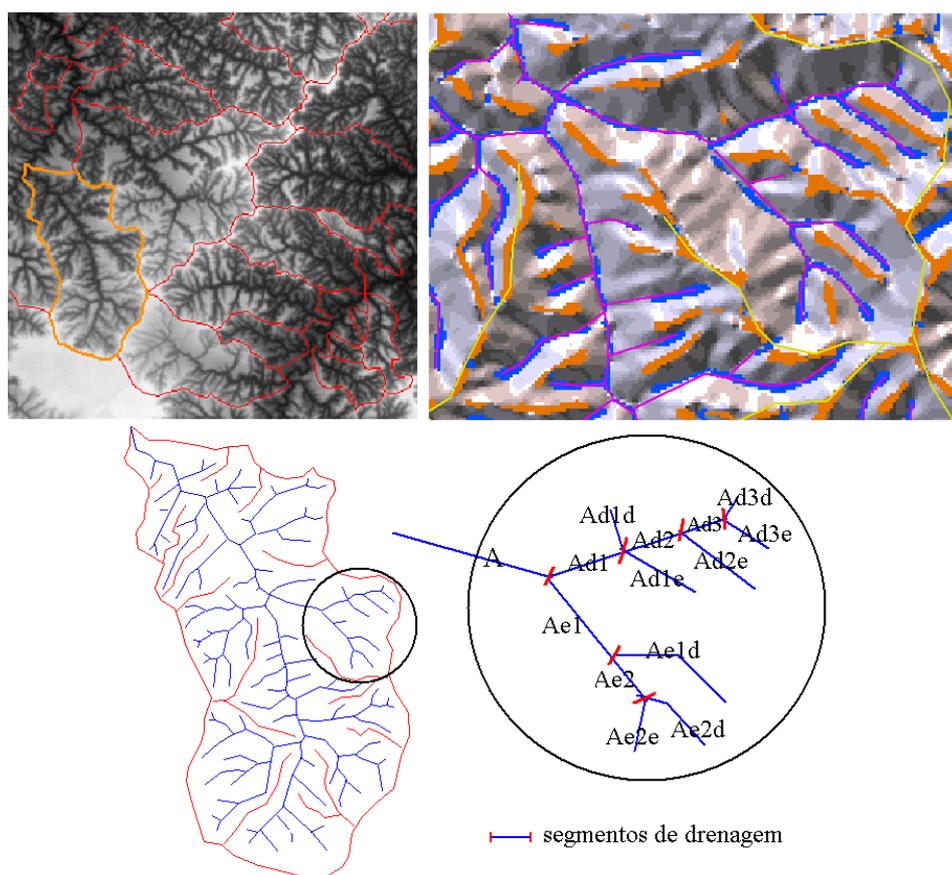


Figura 2.9 - Esboço dos divisores de água das principais microbacias sobre altimetria (esq.); vetor de divisores (amarelo) sobrepostos à representação ADD (dir.) para esboço dos canais de drenagem (magenta); organização dos segmentos para o planejamento da digitalização (abaixo).

O objetivo deste esboço é fornecer uma base para que se defina a estrutura da drenagem a ser digitalizada, isto é, o registro das conexões entre os segmentos de drenagem. Portanto, seu desenho não requer fidelidade

posicional nem de forma, desde que permita associação inequívoca com as feições observadas nos dados. A estrutura deve ser analisada ao se completar o respectivo vetor, para que se programe a digitalização final, de acordo com o desenho de banco de dados pretendido para a drenagem. Nesta etapa, pode ser conveniente uma impressão do esboço da drenagem para análise visual, marcação de identificadores e planejamento da digitalização dos segmentos.

Uma vez planejada a estrutura final de digitalização da rede de drenagem, esta deve ser feita sobre representações ADD, orientação de vertentes e curvatura horizontal. Representações das duas últimas variáveis fornecem o posicionamento mais detalhado dos canais de drenagem e dos divisores, permitindo sua digitalização relativamente precisa em grandes ampliações (Figura 2.10). Porém, devido à extrema sensibilidade à condição de canais e divisores de água, costumam induzir a um traçado superestimado das feições de drenagem, quando não planejado. Portanto, o traçado final dos segmentos, em ampliação, deve ser feito com a sobreposição do esboço da drenagem (com o planejamento da digitalização) sobre as imagens de orientação de vertentes e curvatura horizontal.

É importante assinalar que as técnicas de extração da drenagem baseadas em derivações são afetadas pelo efeito dossel. Na Figura 2.11, a imagem de altimetria mostra uma região de baixa densidade de drenagem em toda porção sudoeste da área, em que se concentram terrenos de declividade A e B (tons claros).

Observa-se a desorganização da orientação de vertentes (Figura 2.11) nas áreas de menor declividade, conforme exemplificado na Figura 2.4. Porém aqui a manifestação deste efeito se estende a terrenos de declividade B, o que pode se explicar pelas variações de efeito dossel, que podem superar as variações topográficas dadas pela ligeira inclinação do terreno. Nestas áreas, a imagem ADD apresenta um padrão confuso com numerosas feições cuja leitura deve ser descartada. Entre as diversas condições desfavoráveis para o delineamento de canais de drenagem e divisores de água, esta é uma das

principais situações pelas quais se recomenda a abordagem progressiva descrita acima.

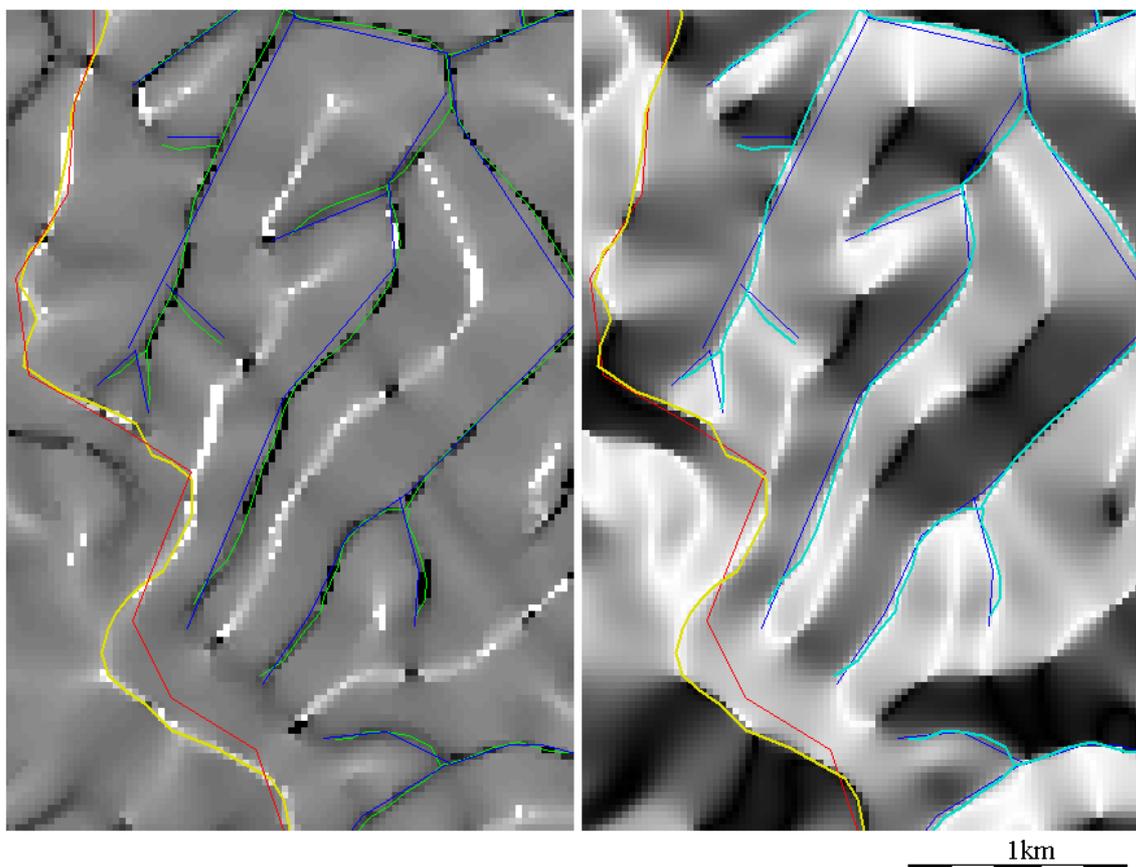


Figura 2.10 - Digitalização final (verde e cian) das feições de drenagem sobre esboço dos divisores de água (amarelo) e dos canais de drenagem (azul) sobrepostos à curvatura horizontal (esq.) e à orientação de vertentes (dir.).

Para a operacionalização dessa metodologia, há que se prever um número de horas-intérprete para digitalização desses vetores, proporcionais ao tamanho da área de interesse e ao nível de detalhe em que se deseja mapear. Uma vez que se considera esta digitalização um trabalho que requer mais treinamento do que formação em geoprocessamento, acredita-se que sua aplicação sobre grandes áreas possa ser executada por uma equipe de digitalização composta por profissionais de nível médio/técnico. Recomenda-se, porém que a mesma

equipe seja coordenada e treinada por profissional da geografia ou de áreas afins, de preferência com conhecimento e experiência sobre a própria região de estudo.

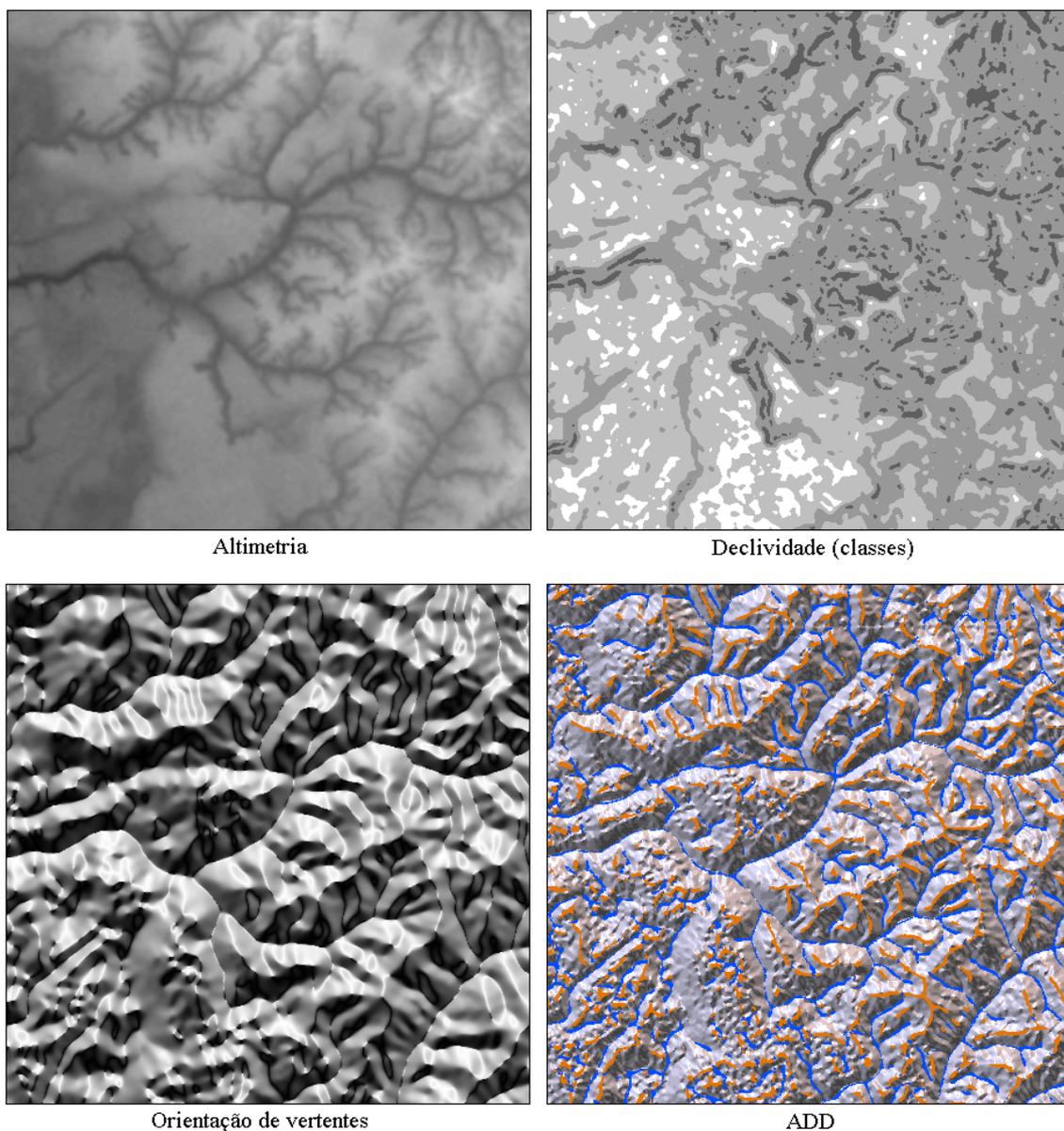


Figura 2.11 - Situação típica de floresta amazônica, desfavorável para o processo ADD: relevo plano e efeito dossel, na porção sudoeste da área.

3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Neste capítulo, os dados geomorfométricos oferecidos serão descritos, identificados e especificados quanto às características formais que afetam sua utilização. Muito de suas características advém de particularidades do desenvolvimento dos métodos empregados, as quais serão também relatadas na medida do necessário.

3.1 Planos de informação

Os métodos aplicados na construção deste banco de dados foram desenvolvidos paulatinamente, ao longo de alguns anos, e com apoio de uma sucessão de recursos computacionais, sobretudo SIG e associados. A fim de se preservar o funcionamento dos algoritmos assim desenvolvidos e, ao mesmo tempo, garantir a conversibilidade entre diferentes programas em suas múltiplas atualizações, todo o processamento foi mantido em programas que hoje se encontram desatualizados. No entanto, é perfeitamente possível que os mesmos sejam convertidos para formatos compatíveis com recursos mais atuais, de acordo com a conveniência do usuário, embora esteja previsto que futuramente será possível oferecê-los em formato a ser escolhido de uma lista de opções. Nesta primeira versão, a totalidade dos resultados é oferecida na forma em que as informações foram criadas, além de um jogo adicional de arquivos em formato TIF de representações pictóricas dos mesmos (3.4).

Os dados SRTM foram alvo de uma seqüência de operações, que podem ser resumidas à captura, o refinamento e as derivações geomorfométricas. Desde a primeira etapa, foram separados em folhas compatíveis com a articulação 1:250.000, portanto, folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude. Durante todo o processamento, as especificações cartográficas foram mantidas as mesmas dos dados originais, exceto pela resolução, que foi mudada de 3" (~90m) para 1" (~30m) a partir da interpolação, prosseguindo nessa forma por todas as derivações geomorfométricas. Assim, os dados estão em estrutura

raster, referenciados em latitude/longitude (sem projeção), com coordenadas em graus decimais e *datum* WGS84.

Todos os arquivos foram manipulados seguindo-se a mesma notação para a identificação das folhas desde a captura. As folhas estão identificadas seguindo o prefixo de 6 letras LA_LON, em que LA é a latitude do canto superior esquerdo da quadrícula e LON sua longitude, na seguinte notação: nn5 quando longitude for nn graus e 30' e nn_ quando a coordenada for nn graus inteiros.

A cada folha corresponde um conjunto de dados, ou arquivos. Os dados altimétricos interpolados são apresentados em arquivo único, de extensão GRD. A partir da inserção dos dados interpolados em SIG, cada plano de informação (altimetria e as derivações geomorfométricas) é representado por dois arquivos, de extensões IMG e DOC. O primeiro contém os dados e o segundo é o seu descritor, que contém as informações necessárias para sua leitura no *Idrisi* e para a construção de cabeçalhos em outros SIG. Para estes planos de informação, todos com mesma extensão, foram acrescentados ao nome (isto é, ao prefixo LA_LON) sufixos de duas letras, para identificação das diferentes variáveis. Na Tabela 3.1 estão apresentados os arquivos associados a uma folha, identificados de acordo com seus sufixos e extensões.

Tabela 3.1 - Identificação dos arquivos/planos de informação

CONJUNTO	DESCRIÇÃO	Unid.
la_lon.grd	Altimetria. Dados interpolados, 1" (~30m): formato <i>Surfer 6.0</i>	m
la_lon ZN.img (e .doc)	Altimetria. Dados interpolados, 1" (~30m), formato <i>Idrisi 2.0</i>	m
la_lon SN.img (e .doc)	Declividade na forma numérica.	%
la_lon ON.img (e .doc)	Orientação de vertentes na forma numérica.	°
la_lon VN.img (e .doc)	Curvatura vertical na forma numérica.	°/m
la_lon HN.img (e .doc)	Curvatura horizontal na forma numérica.	°/m
la_lon SA.img (e .doc)	Declividade em 4 classes (MARQUES, 1971).	-
la_lon SB.img (e .doc)	Declividade em 7 classes (LEPSCH et al., 1991).	-
la_lon SC.img (e .doc)	Declividade em 6 classes (EMBRAPA, 1999).	-
la_lon OC.img (e .doc)	Orientação de vertentes em octantes (N, NE, E, SE, S, SW, W e NW).	-
la_lon V3.img (e .doc)	Curvatura vertical em 3 classes.	-
la_lon V5.img (e .doc)	Curvatura vertical em 5 classes.	-
La_lon H3.img (e .doc)	Curvatura horizontal em 3 classes.	-
La_lon H5.img (e .doc)	Curvatura horizontal em 5 classes.	-
La_lon FT.img (e .doc)	Forma de terreno.	-
La_lon DD.img (e .doc)	Delineamento de canais de drenagem e divisores de água.	-

Estes arquivos são oferecidos em conjuntos compactados (pelo programa *WinZip*) sob a notação La_lon.zip (cada um com seu respectivo arquivo GRD) e La_lonTD.zip (cada um com os respectivos 15 planos de informação do *Idrisi 2.0*). As representações pictóricas oferecidas (item 3.4) estão compactados sob a notação La_lonTF.zip, com 14 arquivos cada.

3.2 Arquivos, formatos, aplicativos e conversões

O arquivo primordial da seqüência de processamento dos dados tem extensão .tif, conforme a opção de formato selecionada durante a captura dos dados disponibilizados pela USGS (VALERIANO, 2004). Na mesma fonte, há outras opções para o formato de captura. O primeiro tratamento dos dados de elevação, após a captura, foi a correção de falhas, em que dados inválidos (“buracos”) foram substituídas por cotas interpoladas a partir das elevações válidas em sua vizinhança. Os produtos desta etapa são arquivos de extensão .txt em formato ASCII. Até este ponto do processamento, os dados não são modificados em sua essência (exceto preenchidas as falhas), de modo que todos arquivos representam a mesma informação originalmente disponibilizada. A primeira modificação sensível dos dados foi o refinamento (interpolação), feito em *Surfer 6.0* (GOLDEN SOFTWARE INC., 1995), que resulta em arquivos com extensão .grd. O programa *Surfer* tem entre seus recursos a geração, apresentação e algum manuseio de superfícies numéricas. Entre os recursos de apresentação (via menu: “map”), encontram-se curvas de nível, relevo sombreado e perspectiva ou diagrama de bloco. Os arquivos .grd refinados foram produzidos no formato designado *GS Binary (*.GRD)*, em que cada folha ocupa cerca de 75MB. Porém, o aplicativo permite sua conversão para os formatos referidos por *GS ASCII (*.GRD)* e *ASCII XYZ (*.dat)*, formatos em que dobram de tamanho, para cerca de 153MB. A conversão de formato em *Surfer* é feita através das opções de menu “grid/utility/convert”, em que se deve optar pelo formato de gravação desejado. O formato *GS ASCII*

(**GRD*) foi usado temporariamente para permitir a importação pelo *Idrisi*, em que foram executadas as fases seguintes. Uma leitura destes arquivos pode ser também feita através de qualquer versão do programa *Global Mapper*, de forma confortável, via menu, pelas opções “file/open data file(s)”, sem a necessidade de qualquer intervenção ou informação adicional.

Uma vez importados ao *Idrisi*, os dados altimétricos são armazenados nos arquivos de extensão .img que são associados, um a um, aos arquivos descritores de extensão.doc. Os arquivos descritores são de formato texto, ou ASCII, passíveis de leitura por diversos editores, como Word, WordPad, Notepad etc. Através dele pode-se identificar as informações do tipo de dado e de arquivo, geometria de armazenamento (posição, linhas e colunas) e sistema de georreferência, entre outras. Os dados ausentes no arquivo (título do arquivo, resolução, erro etc.) são opcionais, apesar de estarem implícitos nos dados, e dependem de declaração do usuário. Abaixo está transcrito o conteúdo do descritor de uma das folhas do banco de dados.

```
file title :  
data type : real  
file type : binary  
columns : 5400  
rows : 3600  
ref. system : lat/long  
ref. units : deg  
unit dist. : 1.0000000  
min. X : -46.5000000  
max. X : -45.0000000  
min. Y : -1.0000000  
max. Y : -0.0000000  
pos'n error : unknown  
resolution : unknown  
min. value : 0.0000000  
max. value : 600.6900024  
value units : unspecified  
value error : unknown  
flag value : none  
flag def'n : none  
legend cats : 0
```

Os arquivos de dados (.img) ora armazenados têm diferentes especificações de formato e de tipo, de acordo com a natureza da variável representada e com a necessidade de redução do espaço computacional. Os planos de informação

geomorfométrica das variáveis numéricas (*zn, *sn, *on, *vn e *hn) foram produzidos sob formato real/binário (cerca de 76MB), enquanto suas formas classificadas, assim como o delineamento de talvegues e divisores de água, foram armazenados em byte/binário (cerca de 19MB). A definição destas especificações, além dos próprios formatos, para a disponibilização definitiva é um tema ainda em discussão no desenvolvimento da interface para acesso aos dados por usuários, iniciativa esta conduzida em parceria com a EMBRAPA (CNPTIA).

Enquanto não se tem um sistema automático de conversão de arquivos, é possível transformar estes planos de informação internamente ao *Idrisi 2.0*, com o uso de seus recursos básicos. A forma mais trivial de conversão é feita com as opções via menu “reformat/convert”, em que os planos são armazenados em arquivos típicos de *Idrisi* (*.img/*.doc) com opções para dados em inteiros, reais ou em byte e para arquivos em ASCII ou binários. Alguns desses formatos podem ser lidos diretamente por outros SIG, após a criação de cabeçalhos ou descritores adequados, com alguma edição das extensões dos arquivos.

Outra possibilidade de conversão dentro do *Idrisi 2.0* é o uso dos recursos de exportação (“import/export utility”, via menu, “file/import/export”). Especificando-se a via “export/desktop publishing formats/tifidris” neste módulo, é possível exportar arquivos TIF georreferenciados dos planos de informação cujos dados estejam no formato byte ou inteiro. Arquivos TIF são passíveis de leitura por uma ampla gama de SIG e programas associados, porém essa alternativa exclui dados em números reais, como nos planos zn, sn, on, vn e hn.

No mesmo módulo, especificando-se a via “export/software-specific formats”, é possível a conversão para formatos específicos a diversos programas. Entre estas saídas, as alternativas “grassidr” (para *GRASS*) e “mapidris” (para *Map Analysis Package*) admitem a exportação dos planos de informação com dados em números reais, inteiros ou byte. A alternativa “erdidris” (para *ERDAS*) permite a exportação de dados inteiros ou em bytes, mas não os planos das variáveis numéricas, que requerem números reais.

Uma terceira possibilidade de conversão advém das versões do *Idrisi* posteriores ao *Idrisi 2.0*, que lidam com dados em 32bits (*Idrisi32*, *Kilimanjaro e Andes*). Esses programas permitem a leitura de todo tipo e arquivo vindo do *Idrisi 2.0*, o que significa uma conversão para formatos atuais de maior capacidade de migração entre diferentes programas. Uma vez codificados em 32bits, os dados numéricos (real/binário) de planos de informação armazenados nessas versões (extensão *.rst) são passíveis de leitura, por exemplo, pelo programa *Global Mapper* (versão 7.03 em diante), de grande difusão e dotado de ampla versatilidade de opções para exportação. Os dados em byte, porém, necessitam de uma conversão para números reais (sem perda de informação) antes de serem lidos no *Global Mapper*.

3.3 Esquemas de visualização - paletas

Os planos de informação geomorfométrica são acompanhados de paletas para sua visualização no SIG *Idrisi*. Para a leitura dos mesmos em outros SIG, recomendamos a adoção de esquemas semelhantes de visualização. Sem esse cuidado, muito do que se poderia interpretar dessas informações estará comprometido (VALERIANO, 2007). As paletas fornecidas têm nomes em correspondência com os sufixos e extensão .smp. Exemplos:

Imagem: _____.SN - paletas _SN
Imagem: _____.HN - paletas _HN
Imagem: _____.VN - paletas _VN
Imagem: _____.ON - paleta _ON
Imagem: _____.FT - paleta _FT
Etc.

Para as variáveis numéricas declividade e ambas curvaturas, há mais de uma opção de paleta, de acordo com numeração acrescida a seu nome. Estas opções correspondem a maiores graus de contraste na visualização, eventualmente necessário, devido a distribuições mais estreitas dessas variáveis em determinados locais. Por exemplo, em áreas com declividades muito baixas, a paleta fundamental SN deve fornecer uma imagem quase

branca, com variações muito tênues de cinza. Neste caso, pode-se aplicar a paleta SN1, desenhada especialmente para expressar o máximo de contraste dentro de um intervalo pequeno de valores de declividade.

3.3.1 Altimetria

Devido às numerosas possibilidades de distribuição da altimetria em função da área sob estudo, não foram desenvolvidas paletas especiais para esta variável. Para algumas averiguações simples, pode-se usar a codificação em níveis de cinza *default*, tanto direta (valores baixos escuros) como invertida (valores altos escuros), como a paleta SN, desenhada para a declividade. A observação do relevo sob escalas de cinza, embora operacionalmente simples, é limitada pelo número de faixas de percepção visual humana. Supondo uma capacidade de distinguir 10 níveis de cinza, um relevo de amplitude de 500m, por exemplo, terá em cada faixa perceptível uma amplitude de 50m. Quaisquer feições dentro desta amplitude, mesmo que suficientemente extensas para serem enxergadas, passarão despercebidas dentro de uma única faixa de percepção. Assim, o esquema mais recomendado para a análise visual dos dados altimétricos é aquele conhecido como relevo sombreado (*shaded relief* ou *analytical hillshading*), recurso também disponível na maioria dos SIG. Neste, é possível controlar a posição do iluminante e o exagero vertical, de modo se perceberem feições sutis como a rugosidade do modelo, entre outras. A percepção do relevo se dá pela distribuição da luminosidade em função da geometria de iluminação (ângulos zenital e azimutal de iluminação) relativa à geometria da superfície (ângulos zenital e azimutal de exposição), em cada pixel (Figura 3.1). Uma vez os ângulos de exposição da superfície correspondem aos ângulos de declividade e orientação de vertentes, a observação do relevo sombreado representa a síntese das derivações de primeira ordem.

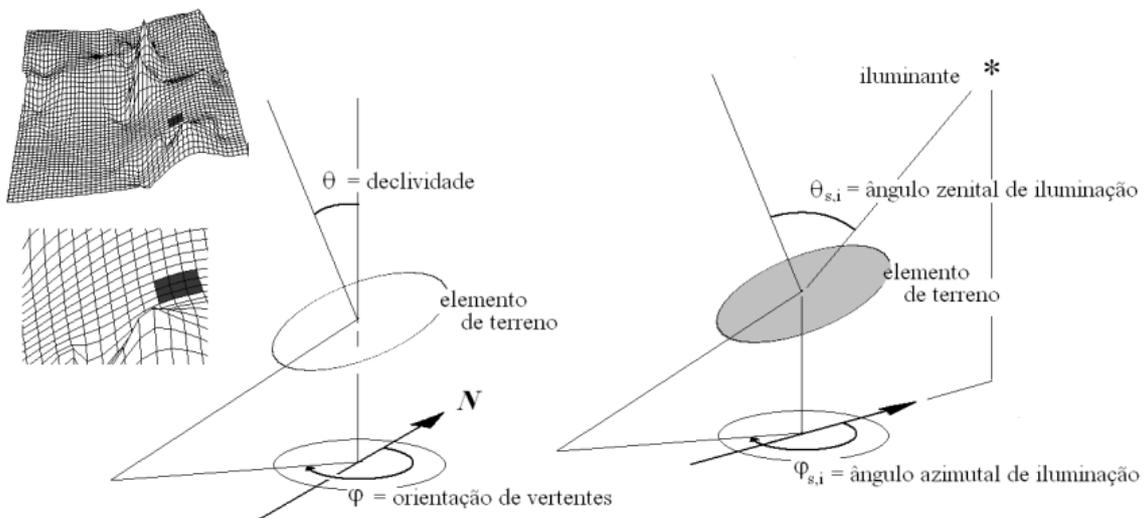


Figura 3.1 - Relação da declividade e da orientação de vertentes com a geometria do relevo sombreado.

Esse esquema pode ser alimentado diretamente pelos dados altimétricos no formato .grd (Tabela 3.1), com o uso do próprio *Surfer*, onde foram preparados, além do programa *Global Mapper*, de uso muito difundido. Nestes programas, o relevo sombreado é um dos recursos mais imediatos para visualização dos dados. Na Figura 3.2 se apresentam diferentes esquemas de visualização de uma mesma área.

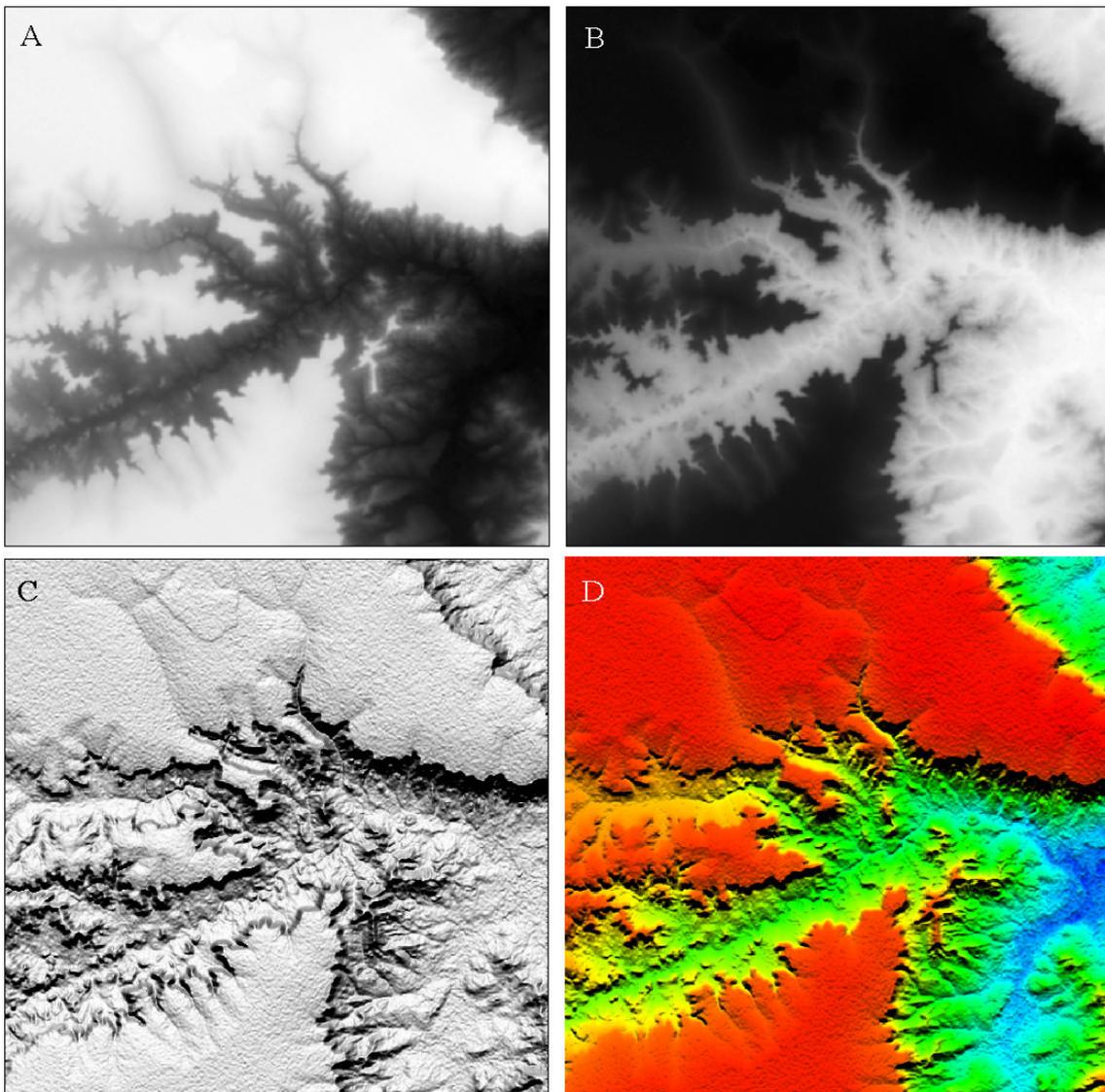


Figura 3.2 - Apresentação da altimetria sob escala de (A) cinza direta, (B) invertida e relevos sombreados do programa (C) *Surfer* e (D) *Global Mapper* (paleta *Atlas Shader*).

3.3.2 Declividade

Para a forma numérica da declividade (___sn), a inversão do sentido de distribuição dos níveis de cinza produz uma representação já conhecida entre as técnicas de sombreamento, denominada Sistema de Lehmann (IMHOFF, 1981). Esta forma tem a grande vantagem de causar uma percepção

tridimensional do modelo, porque reproduz a aparência do mesmo quando iluminado ortogonalmente, bem como o efeito da densidade de isolinhas em áreas íngremes. Uma vez associado aos níveis de declividade, o sistema de Lehmann representa os aspectos verticais do sombreamento isoladamente, sem o efeito da orientação de vertentes. As paletas desenhadas para a representação da declividade, portanto, são invertidas. A paleta _SN tem gradação de cinza partindo do branco para valores nulos, com progressão relativamente acentuada nos valores mais baixos, até preto para um valor a 75% do máximo encontrado na cena. A não-linearidade das paletas SN foi aplicada de modo a compensar a distribuição de frequência típica da declividade, que apresenta sempre histograma assimétrico com concentração em valores baixos. As paletas SN1 e SN2 foram desenhadas para fornecer mais contraste, para os casos em que a declividade tem concentração extrema em valores baixos. Além de acentuar a não-linearidade, estas paletas atingem a cor preta antes (a 75% e a 50%) do valor máximo (Figura 3.3).

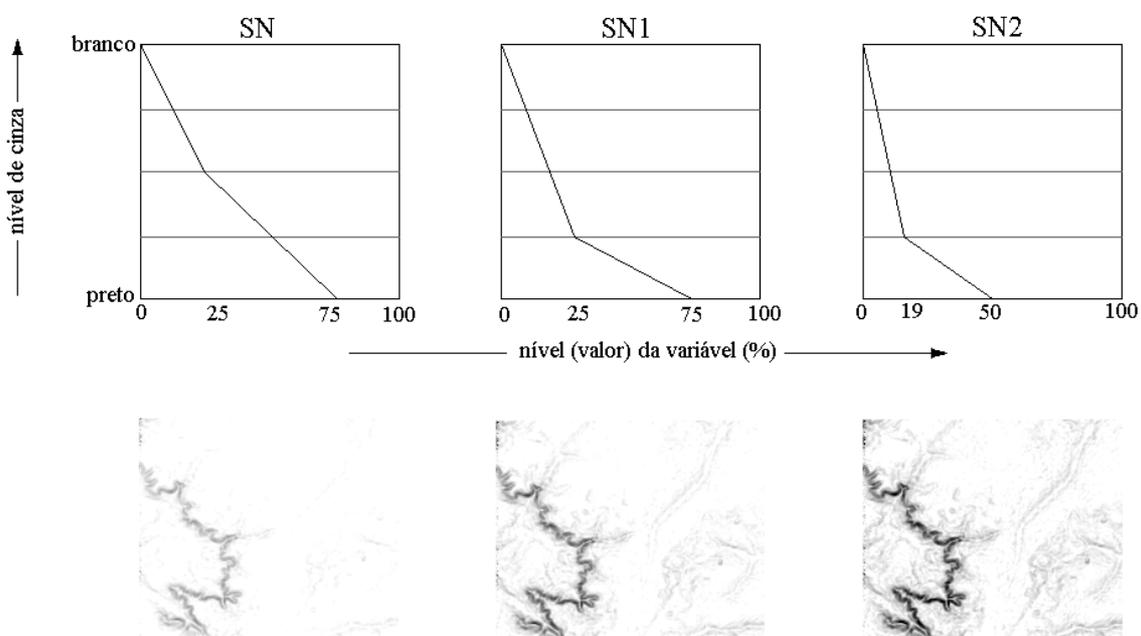


Figura 3.3 - Paletas para representação da declividade na forma numérica.

As formas classificadas da declividade têm paletas igualmente invertidas, com as classes mais íngremes em preto. Na Tabela 3.2, são apresentados os níveis de brilho dos canais R,G e B (vermelho, verde e azul) das paletas usadas na representação da declividade classificada nos diferentes intervalos apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 3.2 - Níveis de brilho adotados nas paletas SA, SB e SC para representação da declividade em classes

SA (MARQUES, 1971)			SB (LEPSCH et al., 1991)			SC (EMBRAPA, 1999)		
Declive:	¹ ID	² R=G=B	Classe:	ID	R=G=B	Relevo:	ID	R=G=B
Suave	1	255	A	1	255	Plano	1	255
Ondulado	2	195	B	2	212	Suave ondulado	2	191
Forte	3	127	C	3	180	Ondulado	3	152
Muito forte	4	63	D	4	143	Forte Ondulado	4	95
-	-	-	E	5	95	Montanhoso	5	63
			F	6	55	Escarpado	6	0
			G	7	0	-	-	-

(1) identificador da classe no SIG; (2) para escalas de cinza, os três canais (R, G e B) têm níveis iguais.

3.3.3 Orientação de vertentes

Para representar a forma numérica da orientação de vertentes (___on), foi desenvolvida uma paleta circular, em conformidade com a natureza desta variável. A adoção de uma paleta circular (com gradação de claros ao Norte até escuros ao Sul) causa uma percepção tridimensional coerente com a estrutura do terreno (Figura 3.4). A percepção do terreno nesta forma ressalta os aspectos horizontais do relevo a despeito de declividades muito pequenas, com realce dos divisores de água e canais de drenagem.

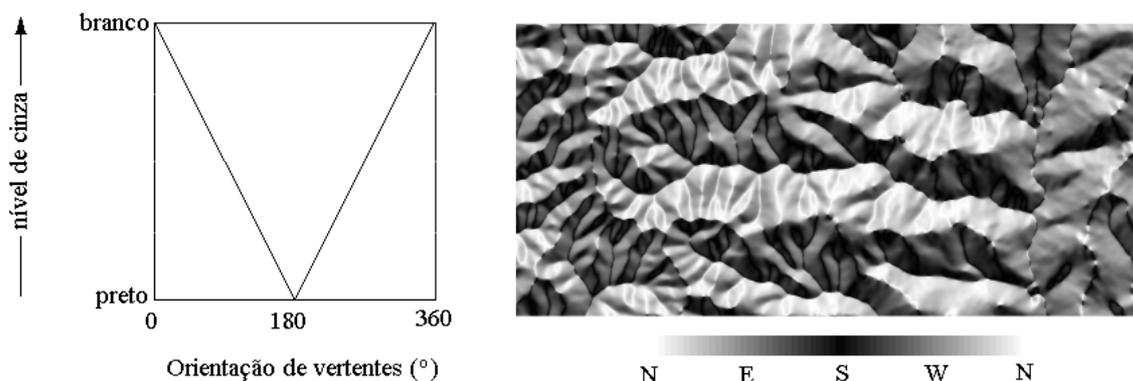


Figura 3.4 - Paleta circular para representação da orientação de vertentes em graus.

A paleta desenhada para representar a orientação de vertentes em octantes (___oc) segue o mesmo princípio de circularidade, apesar de distribuída de forma discreta. Uma versão colorida (oc_cor), de cores mais claras e suaves, é também fornecida para facilitar a digitalização de outras informações sobre áreas ocasionalmente obscurecidas pela paleta preto-e-branco, de maior contraste. A paleta colorida também atribui menor brilho à medida que se orienta mais para o Sul, porém há uma diferença de matiz entre as vertentes expostas a Leste (azuis) e aquelas expostas a Oeste (vermelhas). A Tabela 3.3 contém os níveis de brilho correspondentes aos octantes nas duas paletas.

Tabela 3.3 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) adotados nas paletas OC e OC_cor (.smp) para representação da orientação de vertentes classificada em octantes.

Paleta	Canais	N (1)*	NE (2)	E (3)	SE (4)	S (5)	SW (6)	W (7)	NW (8)
oc	R=G=B	255	207	159	111	63	111	159	207
oc_cor	R	255	191	111	50	115	181	255	255
	G	255	191	119	79	115	105	135	184
	B	255	255	245	215	115	110	135	184

(*) em parênteses, o número identificador de cada classe no SIG.

3.3.4 Curvaturas (horizontal e vertical)

As curvaturas do terreno, derivadas de segunda ordem, não estão diretamente implicadas no sombreamento do relevo e sim à sua variação. Portanto, a codificação em níveis de cinza no sentido direto (altos=claros) não causa falsa percepção de tridimensionalidade, podendo ser usada sem problemas. Neste esquema, áreas convergentes (horizontalmente) ou côncavas (em perfil) aparecem escuras, o que é desejável à medida que tal efeito sugere maior umidade do terreno, coerente com essas condições.

Uma modificação favorável que pode ser feita é uma distribuição não linear dos níveis de cinza, de modo compensar a distribuição numérica dos valores, que costuma apresentar concentração em torno de 0, que corresponde a áreas sem curvatura. Com essa modificação, ganha-se um maior contraste nas áreas em que a curvatura se manifesta (Figura 3.5). A progressão de contraste está assinalada pelos números seguidos ao nomes das paletas vn e hn.

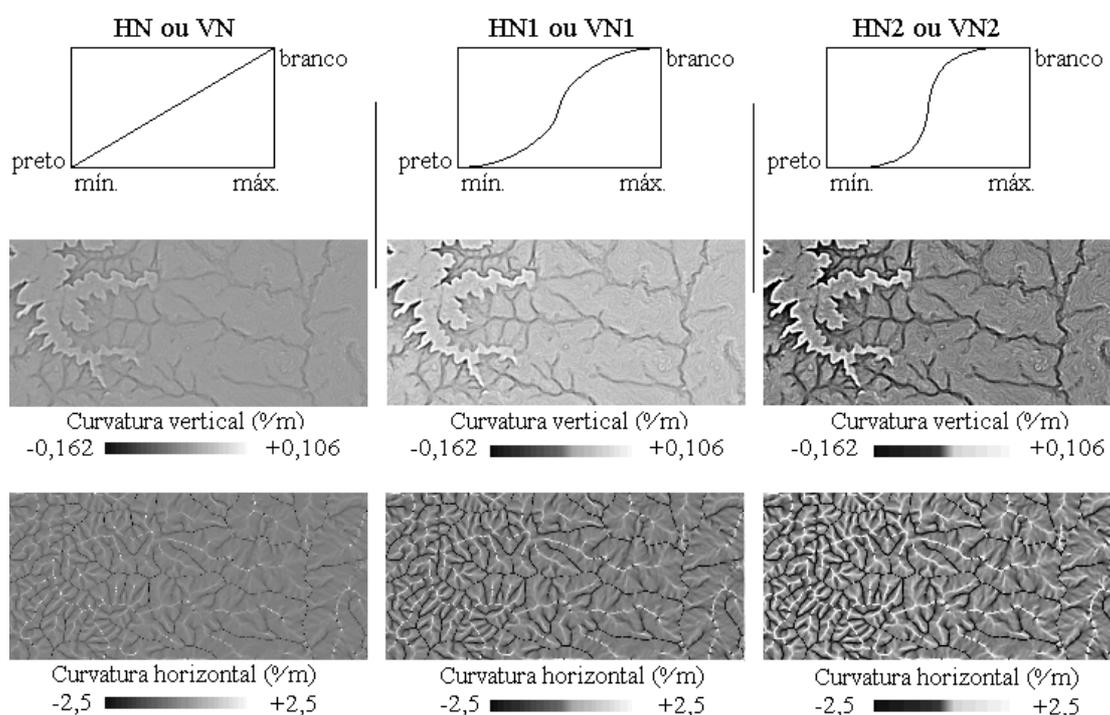


Figura 3.5 - Paletas para representação das curvaturas vertical e horizontal na forma numérica.

Quando classificadas em 3 faixas (côncavo, retilíneo e convexo ou convergente, planar e divergente), as curvaturas são adequadamente representadas em qualquer gradação ordenada de 3 cores. São preferíveis esquemas em que a classe 1 (côncavo ou convergente) esteja associada ao efeito de umidade ou sombreamento, com cores frias ou escuras, enquanto a classe 3 (convexa ou divergente) esteja em condição oposta, com cores mais claras e/ou quentes. Este cuidado faz com que a o estímulo sensorial cause sugestão coerente com a variação das condições físicas do terreno.

Embora sejam possíveis em preto-e-branco as mesmas associações feitas para 3 classes, as curvaturas classificadas em 5 intervalos mostraram-se mais convenientemente representada em paletas coloridas (legenda das Figuras 2.5 e 2.6). Caso seja necessária sua representação em preto-e-branco, deve-se preferir a forma direta (baixos=escuros), o que deve produzir imagem parecida com as representações da forma numérica. A Tabela 3.4 apresenta os níveis de brilho dos canais R,G e B das paletas H5 e V5, para curvaturas em 5 classes.

Tabela 3.4 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) das paletas de cores H5 e V5 (.smp) para curvaturas horizontal e vertical

C.Vertical	C. Horizontal	¹ ID	Canais		
			R	G	B
Muito côncava	Muito Convergente	1	94	78	227
Côncava	Convergente	2	190	190	255
Retilíneo	Planar	3	255	255	255
Convexa	Divergente	4	215	215	123
Muito convexa	Muito Divergente	5	255	118	81

(1) identificador da classe no SIG.

3.3.5 Forma do terreno

Por expressar a variação independente de duas variáveis (curvaturas horizontal e vertical), a forma do terreno não é facilmente representada em esquemas de cores ordenadas por um único atributo. A integração de duas escalas ordenadas tem, no entanto, correspondência com as relações colorimétricas entre as componentes de cada cor. Assim, esta informação deve ser representada em cores, preferencialmente.

As cores usadas na paleta fornecida (FT.smp) foram selecionadas empiricamente, a partir de modificações aplicadas a uma distribuição de cores associada ao conceito das curvaturas. Inicialmente, cores foram associadas às implicações físicas das condições de curvatura em cada combinação. Por exemplo, a classe côncava-convergente foi codificada como azul para simbolizar uma possível influência de umidade nessas áreas. Reciprocamente, terrenos convexo-divergentes foram codificados em amarelo, numa alusão à ocorrência de terrenos mais secos e possível exposição do substrato devido à maior probabilidade de solos mais rasos (MOORE et al., 1993). Assim, embora a forma de terreno constitua uma variável essencialmente qualitativa, há que se considerar que esta integra efeitos que podem ser ordenados pela sua intensidade. Portanto, torna-se desejável que sua codificação siga alguma lógica.

As combinações intermediárias foram estabelecidas após numerosas modificações, em função de testes sobre extensas coleções de dados tratados no desenvolver do banco de dados. Os principais fatores incorporados no desenvolvimento da paleta FT a partir desses testes foram: a proporção territorial das classes em diferentes domínios geomorfológicos; sua distribuição na paisagem (contexto e classes associadas); facilidade de observação quando o grau de generalização causar mistura de cores. Ao final dos testes para seu desenvolvimento, a paleta estabelecida tem a matiz como expressão da curvatura horizontal e o brilho como expressão da curvatura vertical (Figura 3.6). Os níveis de intensidade R,G e B estão apresentados na Tabela 3.5.

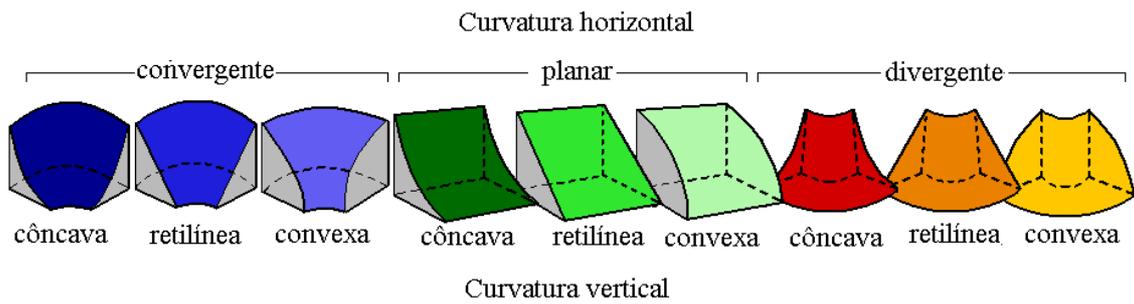


Figura 3.6 - Legenda de cores da paleta FT para representação das formas de terreno.

Tabela 3.5 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) da paleta de cores FT (.smp) para formato de terreno

Curv Horizontal	Curv. Vertical	1ID	Canais		
			R	G	B
Convergente	côncavo	5	0	0	155
	retilíneo	6	58	58	220
	convexo	7	161	181	255
Planar	côncavo	9	0	124	0
	retilíneo	10	0	205	0
	convexo	11	205	255	209
Divergente	côncavo.	13	213	0	0
	retilíneo	14	233	142	0
	convexo	15	255	240	0

(1) identificador da classe no SIG.

A ordenação de brilho e matiz em função das componentes da forma do terreno permite que se possam interpretar variações em escalas generalizadas. A adoção de uma paleta qualitativa sem estas características dificulta a interpretação em detalhe e a impossibilita em escala generalizada (Figura 3.7).

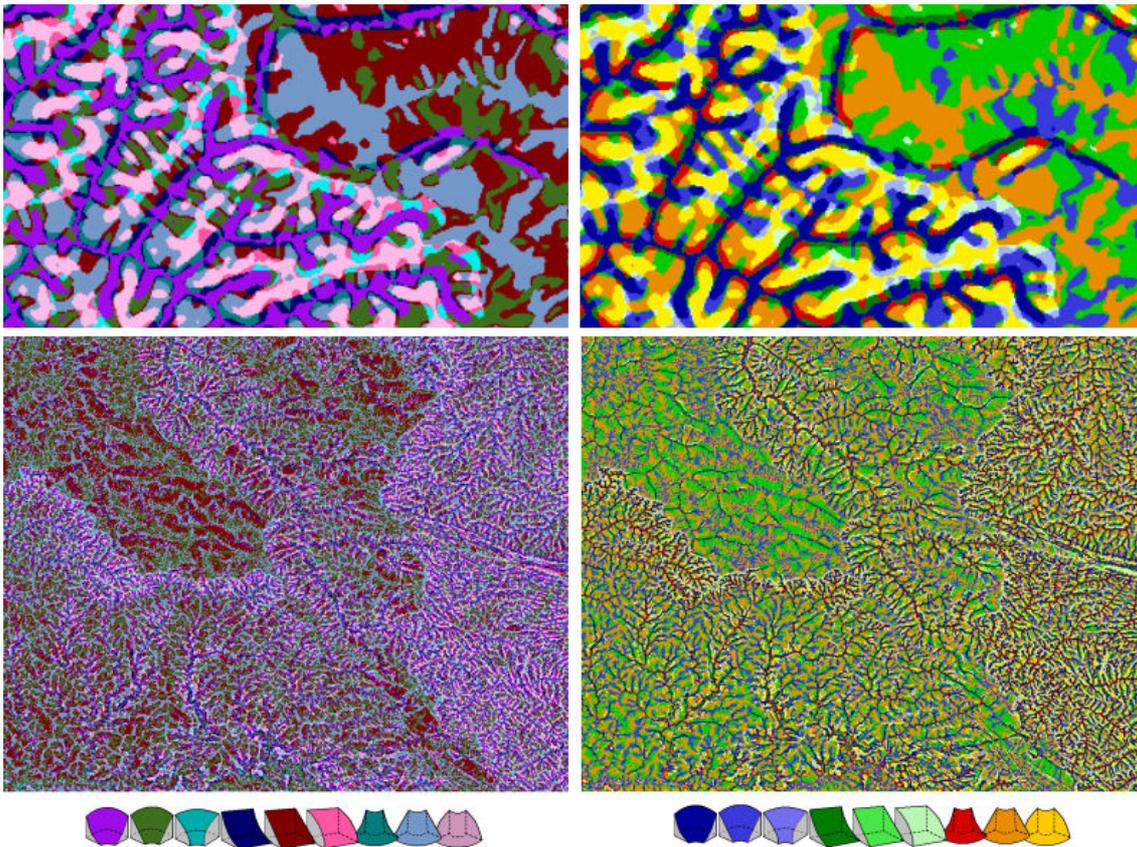


Figura 3.7 - Ganho de percepção da forma do terreno com o ordenamento das cores em escalas detalhadas (acima) e generalizadas (abaixo). Esquerda: representação com paleta qualitativa *default*; direita: paleta FT.

3.3.6 Delineamento de microbacias

O produto fornecido para apoiar o traçado das feições de drenagem (`__dd`) apresenta o delineamento de talvegues e divisores de água sobreposto a uma codificação de classes de orientação de vertentes em 16 semi-octantes ($360^\circ/16$). Para as classes de orientação (identificadores de 1 a 16), foram tomados os mesmos cuidados aplicados a todas representações dessa variável (item 3.3.3), isto é, um escurecimento à medida que a direção aponta para o Sul.

A versão colorida (`_dd.smp`) apresenta diferença de matiz entre as classes de orientação dos hemisférios Leste e Oeste. Os canais de drenagem e os

divisores de água foram associados a cores mais saturadas (azul e ocre, respectivamente). Uma versão preto-e-branco (dd_pb.smp) foi elaborada com as 16 classes de orientação codificadas numa faixa relativamente restrita de brilho, próxima do cinza médio (Figura 3.8). Assim, os talwegues e os divisores (identificador 17 e 18, respectivamente) podem ser sobrepostos em preto (nível 0) e em branco (nível 255) sem que haja confusão entre estas feições e as classes de vertentes. Na Tabela 3.6 estão apresentados os níveis de intensidade R,G e B destas paletas.

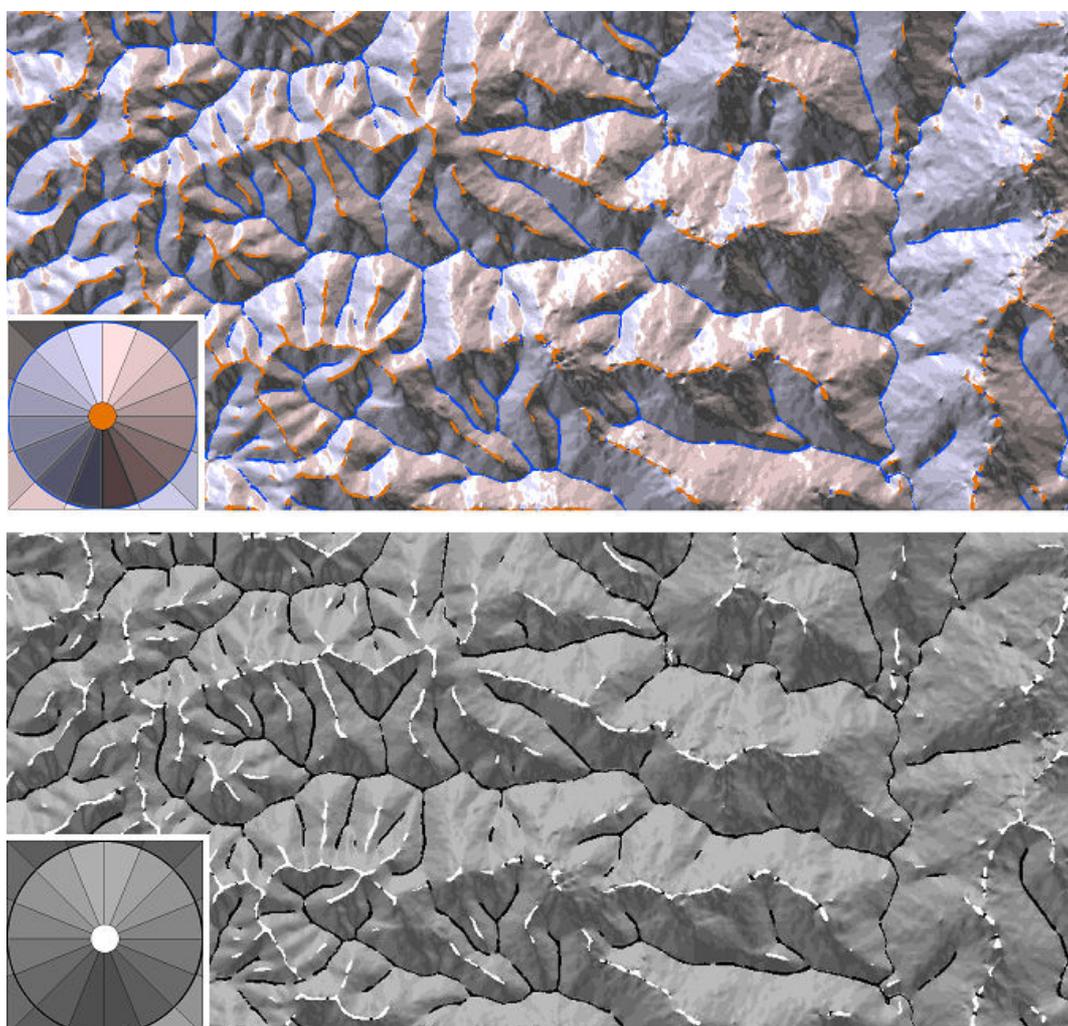


Figura 3.8 - Esquemas colorido e preto-e-branco de representação do delineamento de microbacias.

Tabela 3.6 - Níveis de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) das paletas DD e DD_pb (.smp) para delineamento de microbacias

¹ ID	² Canais			³ P&B (R=G=B)	ID	Canais			P&B (R=G=B)
	R	G	B			R	G	B	
1	255	223	223	174	10	86	86	108	93
2	230	200	200	160	11	109	109	132	106
3	206	177	177	147	12	132	132	157	120
4	181	154	154	133	13	156	154	181	133
5	157	132	132	120	14	179	177	206	147
6	132	109	109	106	15	202	200	230	160
7	108	86	86	93	16	225	223	255	174
8	83	63	63	79	17	0	77	255	0
9	63	63	83	79	18	255	122	0	255

(1) identificador da classe no SIG; (2) esquema colorido: dd.smp; (3) esquema preto-e-branco: dd_pb.smp.

3.4 Representações em formato TIF

Um conjunto de representações pictóricas dos principais planos de informação em formato TIF foi elaborado para flexibilizar as opções de consulta desde programas especializados (SIG) até os mais simples editores gráficos. Estas representações têm no máximo 256 níveis, motivo pelo qual as variáveis numéricas (sufixos zn, sn, on, vn e hn) tiveram seu novo valor dissociado de suas características originais (unidades, distribuição etc.). Isso delimita sua utilidade como insumo para consultas, verificações e interpretação visual, conforme projetado, independente de sua inserção em SIG. Os planos de informação não-numéricos (em classes), por sua vez, estão fielmente representados nas classes e codificações de legenda pormenorizadas no item 3.3.

3.4.1 Codificação das representações TIF

Os dados de elevação foram elaborados sob as representações em níveis de cinza (la_lonZN.tif) e em relevo sombreado (la_lonIL.tif). No primeiro caso, os

dados passaram por um realce de histograma no qual 1% dos pixels em cada extremo de sua distribuição em cada folha foram saturados. Em outras palavras, níveis de cinza, do preto ao branco, estarão associados à mínima e à máxima elevação encontradas dentro de cada folha. Dessa forma, ressalta-se que não se deve esperar consistência entre folhas diferentes, quando justapostas. De todo o conjunto TIF, este é o único caso em que não se pode manter a consistência das legendas sem perdas importantes do poder descritivo das representações. A representação do MDE em relevo sombreado (la_lon1L.tif) seguiu um esquema inicial de iluminação a 0° de azimute (Norte) e 45° de elevação solar, com um exagero vertical de 3x. Como alternativa, a inclusão de um segundo esquema (la_lon12.tif) está planejada para a primeira revisão do banco de dados TOPODATA. Esta opção tem iluminação a 0° (Norte) e 60° de elevação solar, com um exagero vertical de 12x.

As demais variáveis numéricas foram todas codificadas nas diferentes paletas elaboradas em níveis de cinza (diretas e inversas – v. item 3.3), após um escalonamento linear para o intervalo de 0 a 255, feito por realce de contraste. Este preparo foi aplicado ora para obter um contraste desejado às representações, ora simplesmente em atendimento a necessidades de formato para a criação dos arquivos TIF.

A declividade em porcentagem foi codificada sob a paleta _sn (Figura 3.3) após um realce linear de contraste, aplicado no intervalo de de 0% a 100%. Portanto, as áreas planas se apresentam brancas, escurecendo com o aumento da declividade até 45°, saturando em preto a partir de então, de forma a simular o esquema de Lehmann. A orientação de vertentes foi codificada sob a paleta _on (Figura 3.4) após um realce linear de contraste, aplicado no intervalo de 0° a 360°. As curvaturas foram codificadas sob as paletas _hn e _vn2 (Figura 3.5) após um realce linear de contraste, nos intervalos de -0,35°/m até +0,35°/m (curvatura vertical) e de -4,5°/m a +4,5°/m (curvatura horizontal).

3.4.2 Georreferência

Os arquivos podem ser inseridos em SIG para variadas finalidades. Quando inseridos para integração com outras informações, estas representações em TIF requerem que o usuário realize a georreferência manualmente. Embora não se esperem encontrar feições viáveis como pontos de referência nestes mapas, a geometria da estrutura de armazenamento dos dados é conhecida e padronizada em todas as folhas. Dessa forma, a georreferência é obtida através da declaração, pelo usuário, das coordenadas dos cantos da folha, segundo o esquema exemplificado na Figura 3.9.

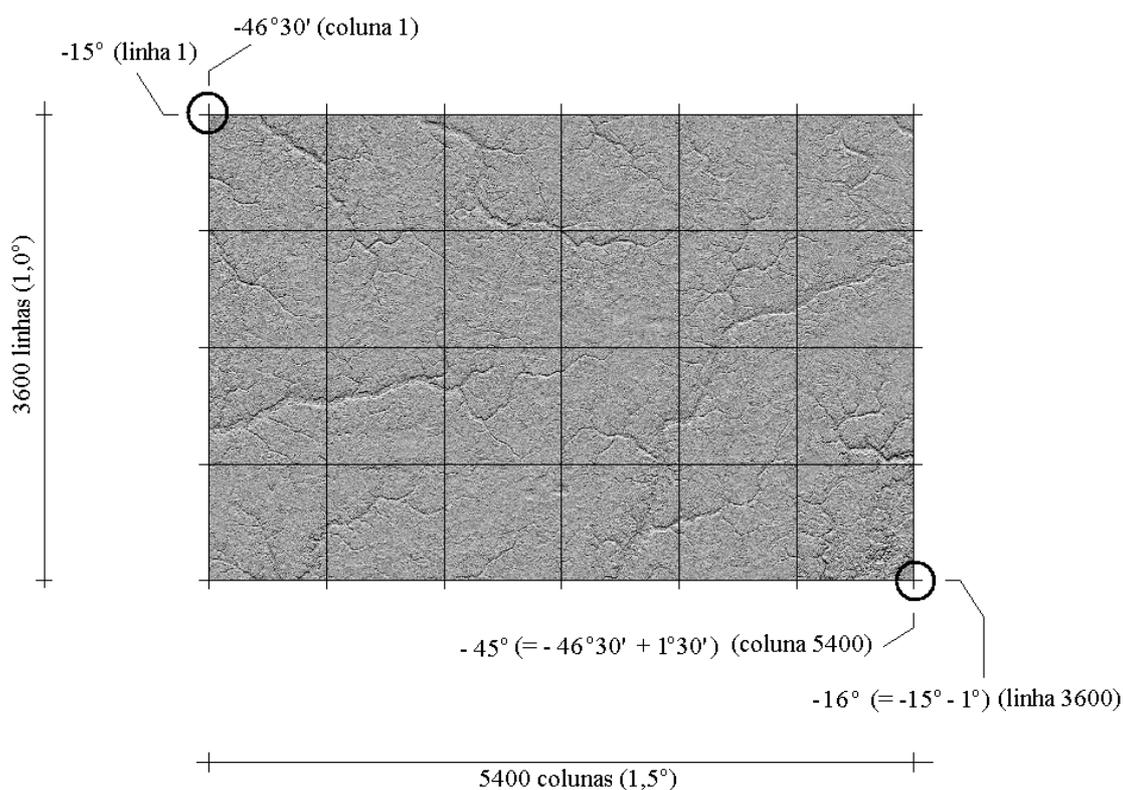


Figura 3.9 - Esquema de georreferência dos arquivos TIF. No exemplo estão coordenadas correspondentes à folha de nome 15_465.

Uma vez que o nome da folha corresponde às coordenadas do canto superior esquerdo de sua extensão, a tomada de pontos de controle pode ser feita de

maneira previsível em todas as quadrículas. Para tanto, basta lembrar a geometria de armazenamento, padronizada, em 3600 linhas por 5400 colunas, em que a posição na coluna 1 (ou 0, para alguns programas) e na linha 1 (ou 0) tem as coordenadas expressas no sufixo do nome dos arquivos, enquanto a posição na coluna 5400 (ou 5399) e na linha 3600 (ou 3599) as tem deslocadas 1 grau para o Sul e 1,5 graus para o Leste. Caso sejam necessários mais pontos, quaisquer posições intermediárias a estas podem ser calculadas linearmente (Figura 3.9). Eventuais folhas foram produzidas em dimensões diferentes da geometria padrão, em função de sua posição litorânea, ora para acomodar reduzidas porções restantes (ilhas ou partes de ilhas) de quadrículas vizinhas, ora pela pequena dimensão da parte terrestre dentro da própria quadrícula. Na Tabela 3.7 estão relacionados os dados para georreferência dessas folhas que, na primeira versão do banco de dados, se encontram fora do padrão geral de armazenamento.

Tabela 3.7 - Dados para georreferência das folhas estruturadas fora do padrão geral de armazenamento

Folha	colunas	linhas	X _{min}	X _{max}	Y _{min}	Y _{max}
23_465	5400	4500	-46,5	-45	-24,25	-23
24_48_	5400	4500	-48	-46,5	-25,25	-24
09_36_	3600	3600	-36	-35	-10	-9
01_45_	2700	3600	-45	-44,25	-2	-1
29_495	1350	3600	-49,5	-49,125	-30	-29

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIKAU, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v.80, p. 45-55, 1990.
- EASTMAN, J. R. **Idrisi for windows: User's Guide**. Worcester: Clark University, 1995. 440p.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.
- FAHSI, A.; TSEGAYE, T.; TADESSE, W.; COLEMAN, T. Incorporation of digital elevation modelos with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 57-64, 2000.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer version 6.01- surface mapping system**. Golden: Golden Software, Inc., 1995.
- IMHOFF, E. **Cartographic relief presentation**. New York: Walter de Gruyter, 1982. 485p.
- KELLNDORFER, J., WALKER, W., PIERCE, L., DOBSON, C., FITES, J. A., HUNSAKER, C., VONA, J., CLUTTER, M. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and Nation Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment** v. 93, p. 39-359, 2004.
- LE TOAN, T., BEAUDOIN, A., RIOM, J., GUYON, D. Relating forest biomass to SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** v. 30, p. 403-411, 1992.
- LEPSCH, I. F., BELINAZZI JR., R., BERTOLINI, D., ESPINDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de**

terras no sistema de capacidade de uso. 4.a. aproximação. Campinas: SBCC, 1991. 175p.

MARQUES, J. Q. A. **Manual brasileiro para levantamento da capacidade de uso da terra:** 3ª aproximação. Escritório Técnico Brasil-Estados Unidos (ETA), 1971. 433p.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 443-452, 1993.

VALERIANO, M. M. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Espaço e Geografia**, v.5, n.1, p.69-85, 2002.

VALERIANO, M. M. Mapeamento da declividade em microbacias com sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.303-310, 2003.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul.** São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. 2004.

VALERIANO, M. M. Visualização de imagens topográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1377-1384. CD-ROM

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.