

ISSN 1678-0892
Dezembro, 2005

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 84

Delineamento e Parametrização Ambiental de Sub-bacias Hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro

*Thomaz Corrêa e Castro da Costa
Saulo Pedrinha Guimarães*

Rio de Janeiro, RJ
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024 Jardim Botânico. Rio de Janeiro, RJ

Fone: (21) 2179.4500

Fax: (21) 2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Normalização bibliográfica: *Marcelo Machado de Moraes*

Revisão de Português: *André Luiz da Silva Lopes*

Editoração eletrônica: *Pedro Coelho Mendes Jardim*

1ª edição

1ª impressão (2005): online

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Costa, Thomaz Corrêa e Castro.

Delimitação e parametrização ambiental de sub-bacias hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro [recurso eletrônico] / Thomaz Corrêa e Castro da Costa, Saulo Pedrinha Guimarães - Dados eletrônicos. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2005.

(Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892 ; 84)

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de Acesso: <<http://www.cnps.embrapa.br>>

Título da página da Web (Acesso em: 15 dez. 2005).

1. Delimitação Automática. 2. Bacia Hidrográfica. 3. Suporte a Decisão. I. Guimarães, Saulo Pedrinha. II. Embrapa Solos. III. Título. IV. Série.

CDD (21.ed.) 631.41

© Embrapa 2005

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e Métodos	13
Resultados e Discussão	25
Considerações Finais	38
Referências	39

Delineamento e Parametrização Ambiental de Sub-bacias Hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro

Thomaz Corrêa e Castro da Costa¹

Saulo Pedrinha Guimarães²

Resumo

Bacias hidrográficas são consideradas unidades de gestão e planejamento ambiental para monitoramento hidrológico, conservação do solo e disciplinamento do uso da terra, devido à importância na produção de água em qualidade e quantidade. A Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei nº 9433 de 1997, Decreto nº 2612 de 1998) tem como finalidade organizar a gestão de BH entre usuários de água que envolvem setores produtivos e da sociedade civil, em diferentes esferas administrativas, e que exige uma subdivisão do território em grandes bacias, sub-bacias e microbacias hidrográficas. Para o Estado do Rio de Janeiro existem delineamentos em regiões específicas, resultantes do programa de despoluição da Baía de Guanabara (PDBG) e do projeto GEROE. Para uma compartimentação em unidades de gestão ambiental com maior escala, e para todo o Estado do Rio de Janeiro, foi executada uma delimitação automática com posterior edição, sendo estas bacias parametrizadas com a finalidade de indicar o seu grau de vulnerabilidade por meio de uma técnica de suporte à decisão conhecida como análise multicritério. O resultado indica que as bacias mais vulneráveis concentram-se nas

¹Pesquisador da Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1.024. CEP. 22.460-000, Jardim Botânico, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: thomaz@cnpes.embrapa.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Depto. Geologia, Email: saulopg@superig.com.br

regiões Noroeste e Norte do estado, sendo que as que apresentaram maior grau de vulnerabilidade acompanham o Rio Paraíba do Sul da região central do estado até sua foz, sendo considerada, portanto, uma indicação de áreas para programas de recuperação ambiental.

Termos para indexação: delimitação automática, bacia hidrográfica, suporte à decisão.

Delineament and Environment Parametrization of Watersheds for Rio de Janeiro State

Abstract

Watersheds are environment planning units for hidrologic monitoring, soil conservation and correct land use, with importance of the quantity and quality water production. The National Policy of the Hidric Resources (Lei nº 9433 of 1997, Decreto nº 2612 of 1998) has as purpose to management the Watershed in scales administrative, of the production and civic, that demand the subdivision of the Brazil in watersheds of diferents orders. For the State of Rio de Janeiro exist surveys in especif regions by Guanabara Watershed Despolution Program and GEROE project. For the subdivision in environment management units with great scale and hole area, it was runned automatic delineament with post edition. At other fasis was executed the parametrization of the watersheds for indication the vulnerability index of the watershed by multicriterion analysis. The result indicate that more vulnerability watersheds occur at nortwest and north of the State and majority index occur on the Paraíba do Sul river in the center of the state until the sea. These areas are indicates for environment recuperation.

Index terms: automatic delineament, watershed, decision support.

Introdução

A unidade física natural, Bacia Hidrográfica (BH), é a área que drena as águas das chuvas por ravinas, canais e tributários, para um curso principal, com vazão afluyente convergindo para uma única saída e desaguardo diretamente no mar, em um grande lago, ou em um rio de maior ordem, no caso de Sub-bacias, que podem ser divididas também em microbacias (Rocha, 1991).

As sub-bacias e microbacias podem ser classificadas também conforme a menor ordem dos rios contidos na mesma. Uma bacia de 3ª ordem, por exemplo, contém ravinas (1ª ordem), canais (2ª ordem) e tributários perenes de até 2m de largura (3ª ordem) (Rocha, 1991).

Bacias, sub-bacias e microbacias hidrográficas podem ser consideradas unidades de gestão e planejamento ambiental (Collares, 2000), tanto no meio rural como urbano, pela possibilidade de monitoramento hidrológico, de planejamento de conservação do solo e do disciplinamento do uso da terra, devido a sua relação com o ciclo hidrológico, e sua importância na produção de água em qualidade e quantidade; por ser uma compartimentação do ambiente que contribui no controle da captação, armazenamento e drenagem da água associada aos fatores de relevo, solo, cobertura da terra e clima.

A Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei nº 9433 de 1997, Decreto nº 2612 de 1998) dispõe sobre a criação de comitês e agências de bacias e a participação de organizações civis no planejamento ambiental e na elaboração de planos diretores para bacias hidrográficas, sendo consideradas estas de médio e grande porte. Estratificações baseadas na caracterização ambiental e socioeconômica são necessárias para definir a escala de trabalho compatível com os objetivos de gestão (Collares, 2000).

A estrutura organizacional desta política se configura em um Conselho Nacional de Recursos Hídricos, com Comitês de Bacias Hidrográficas, Agências de Bacias e Organizações Civis de Recursos Hídricos. Esta estrutura induz, para sua gestão, uma subdivisão do território em Grandes Bacias, Sub-bacias e Microbacias hidrográficas.

Delimitação de Bacias Hidrográficas

Os órgãos envolvidos com a gestão de recursos hídricos no Brasil não utilizavam um único método de classificação e codificação de bacias hidrográficas para o todo o território. Galvão e Meneses (2005) compararam os métodos de classificação e codificação de bacias hidrográficas empregados pelo DNAEE/ANEEL, IBGE, SRH e CNRH e verificaram a preferência pelo método desenvolvido pelo Eng. Agrônomo Otto Pfafstetter, por tratar-se de um método natural, hierárquico, baseado na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem, e na forma de codificação de bacias, de fácil integração com os Sistemas de Informação Geográfica-SIG. Sua representação é na escala 1:1.000.000, no quinto nível de classificação, definindo sub-bacias com um tamanho médio de aproximadamente 6.200 Km² (Galvão; Meneses, 2005).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH, buscando padronizar uma metodologia apropriada para gestão dos recursos hídricos em todo o território, resolve adotar a metodologia de Pfafstetter para subdivisão e codificação de bacias hidrográficas (Resolução nº 30 de 2002).

O Estado do Rio de Janeiro adotou outra metodologia para estabelecer unidades básicas de planejamento e intervenção da gestão ambiental, compartimentando o território em 7 (sete) Macrorregiões Ambientais (Figura 1), formadas por uma ou mais sub-bacias hidrográficas, oficializadas pelo Decreto Estadual nº 26.058 de 14 de março de 2000 (Hora; Teuber, 2001). A divisão em macrorregiões levou em conta critérios técnicos-ambientais, administrativos e políticos.

Um destaque é dado para a MRA-1 "Bacia da Baía de Guanabara, das Lagoas Metropolitanas e Zona Costeira Adjacente" (4.082 km²), (Figura 2), que compreende 7 sub-bacias hidrográficas:

- bacia hidrográfica da Baía de Guanabara;
- microbacias hidrográficas insulares da Baía de Guanabara;
- bacia hidrográfica da Baixada de Jacarepaguá;
- bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas;

- microbacia hidrográfica oceânica da Urca, Leme e Copacabana;
- bacia hidrográfica das Lagunas de Piratininga e Itaipu;
- bacia hidrográfica do Sistema Lagunar de Maricá.

Embora descritas as sub-bacias que constituem a MRA-1, não são apresentados seus limites no referido documento. Existem outros levantamentos em regiões específicas do Estado do Rio de Janeiro, resultantes do programa de despoluição da Baía de Guanabara (PDBG) e do projeto GEROE (FCIDE), que também chegaram à delimitação de sub-bacias.

Para atender ao objetivo do Projeto “Estratégias e Ações para Conservação da Floresta Atlântica do Estado do Rio de Janeiro” que exige uma compartimentação em unidades de gestão ambiental com maior escala, foi executada neste trabalho uma delimitação automática com posterior edição, objetivando delineamentos de sub-bacias de menor ordem, não executados até o presente para o Estado do Rio de Janeiro. Com a correção do modelo de elevação e uma rede hidrográfica confiável é possível obter resultados com boa exatidão neste processo.

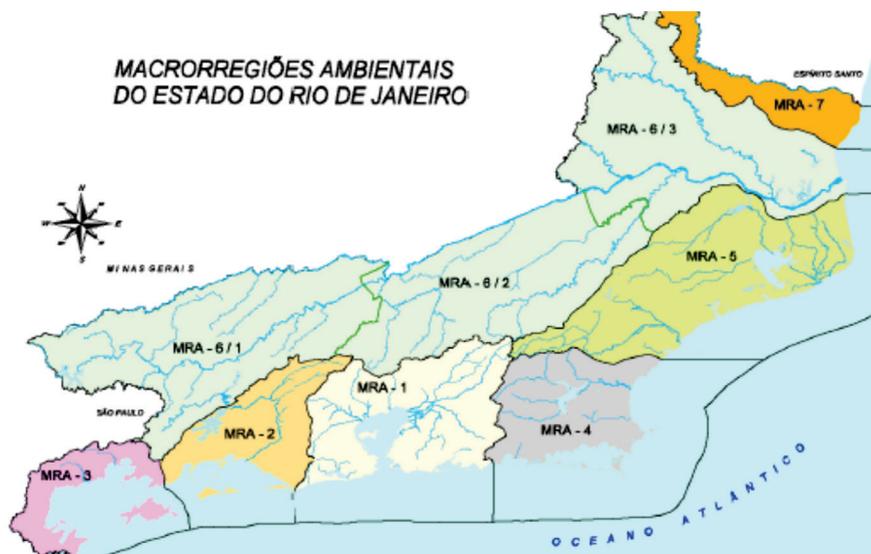


Figura 1. Macrorregiões Ambientais para o Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: (Hora; Teuber, 2001).

A densidade de drenagem é um indicador da eficiência natural ao escoamento superficial de água em uma bacia hidrográfica, informando a probabilidade de ocorrência de cheias, a intensidade de processos erosivos e também a permeabilidade (transmissibilidade) do terreno da bacia. Por este parâmetro, pode-se compreender melhor a susceptibilidade aos processos erosivos em determinada bacia, assim como a dinâmica do escoamento de águas superficiais.

Bacias hidrográficas com altas densidades de drenagem apresentam baixas transmissibilidades do terreno (impermeáveis), ao contrário de bacias com baixas densidades de drenagem que apresentam alta transmissibilidade do terreno (permeáveis).

Com a diminuição da transmissibilidade, aumenta-se a susceptibilidade à erosão e a dispersão de água por escoamento superficial (*runoff*), acarretando no aumento do potencial de transmissão de contaminantes em águas superficiais.

Por outro lado, em terrenos com alta transmissibilidade, diminui a atuação de processos erosivos e aumenta o potencial de contaminação de águas subterrâneas, devido à maior capacidade de infiltração de águas superficiais.

Assim, este trabalho teve como objetivo:

- delimitar, automaticamente, sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro;
- fornecer alguns parâmetros ambientais por sub-bacias; e
- indicar o grau de vulnerabilidade de cada sub-bacia.

Material e Métodos

Para a delimitação automática com posterior edição e a parametrização de sub-bacias, foram utilizados o Modelo Digital de Elevação da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) corrigido para o Estado do Rio de Janeiro (Costa et al., 2005), cartas topográficas, escala 1:50.000, do

Levantamento Sistemático da Divisão do Serviço Geográfico do Exército - DSG e da FIBGE, Mapeamentos de Uso e Cobertura da Terra (FCIDE, 2005; Fundação SOS Mata Atlântica, 2002), fornecidos para o Projeto “Estratégias e Ações para Conservação da Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro”, dados do Censo Agropecuário de 1996 da FIBGE e uma técnica de suporte à decisão conhecida como análise multicritério (Eastman, 1995).

Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas

No delineamento de sub-bacias hidrográficas foi utilizado um módulo implementado no software Idrisi Kilimanjaro (Eastman, 2003) que é uma modificação do algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988), testado em modelos digitais de elevação com escalas distintas (1:24.000 e 1:250.000) que, nas comparações entre bacias hidrográficas delimitadas automaticamente com bacias traçadas manualmente das cartas topográficas, revelou concordâncias da ordem de 97 e 98% (Zariello, comunicação pessoal, 1986 e Verdin, comunicação pessoal, 1988, citados por Jenson e Domingue (1988)). O algoritmo descrito em Jenson e Domingue (1988) é desenvolvido nas seguintes fases de extração de informações do modelo digital de elevação:

1) Eliminação de depressões: corresponde a retirar do modelo feições de abaciamento, que interrompem o fluxo hídrico. Neste processamento, pixels com cotas mais baixas, que têm variação de cota maior que o limiar estabelecido em relação a sua vizinhança, são identificados e uniformizados para a cota mais baixa da vizinhança, permitindo a continuidade do fluxo. Após a correção, todos os pixels têm uma direção e sentido de drenagem. As matrizes (a) e (b) exemplificam este procedimento (Figura 3) mostrando o modelo digital de elevação original e com o ajuste de depressões respectivamente. Para o DEM/SRTM do Estado do Rio de Janeiro, esta operação foi executada como uma das etapas de correção do modelo digital de elevação (Costa et al., 2005).

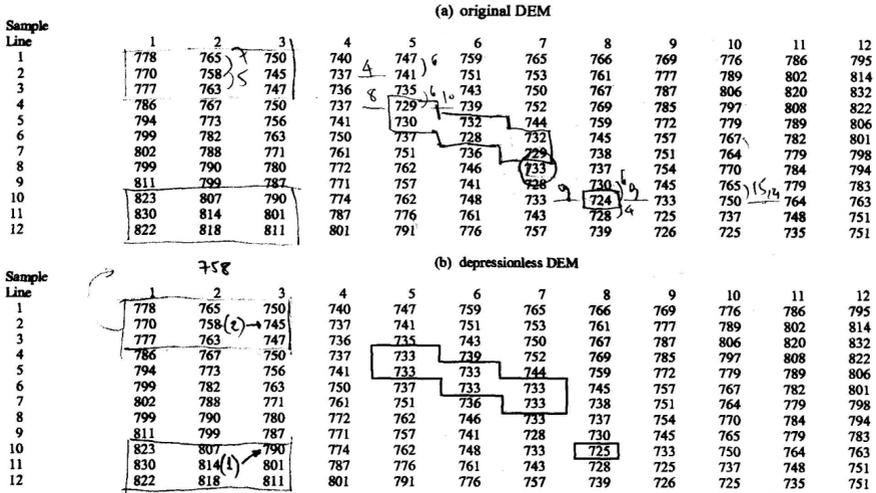


Figura 3. (a) Modelo Digital de Elevação (cotas em pés), com 12 linhas x 12 colunas; (b) Modelo Digital de Elevação com eliminação de depressões.
 Fonte Tabela 2 (Jenson; Domingue, 1988).

2) *Direção do Fluxo*: é determinada para cada célula, em operação de vizinhança, numa matriz 3 x 3, a direção e o sentido do fluxo, em ângulos azimutais em graus ou por ID 2 exponencial (Figura 4). A célula com a mais baixa altitude em relação à célula central é escolhida para a direção do fluxo. O cálculo leva em consideração a distância em diagonal para células da vizinhança dos cantos da matriz.



Figura 4. Matriz de identificação da direção e sentido do fluxo hídrico por (a) ângulo azimutal, ou por (b) ID 2 exponencial (2⁰ a 2⁷).

Um exemplo é dado na Figura 5, em que a matriz (a) contém dados de elevação, com destaque para a matriz central 3 x 3, com cálculos para determinação do fluxo na Figura 5b, com as células codificadas na matriz (c), com representação da direção dos fluxos na matriz (d).

3) *Escoamento superficial (RUNOFF)*: esta etapa tem como finalidade indicar a contribuição de cada pixel em relação à recepção de água, considerando o fluxo hídrico. Assume-se, neste exemplo, uma precipitação de 1mm em cada pixel. Na Figura 5 (e) é mostrado o escoamento superficial (*runoff*) para a matriz 3 x 3 na estrutura raster.

765	764	764	763	763
764	763	762	762	763
764	762	759	758	762
763	761	760	757	758
762	761	761	757	756

(a)

-1.4	-1.0	-0.7	-1.4	-2.0	-0.7	-1.4	-1.0	-0.7
-1.0	0.0	1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0
-0.7	1.0	2.8	0.0	3.0	2.8	2.1	4.0	0.0
-1.4	-1.0	0.0	-2.8	-3.0	-2.1	-2.8	-4.0	-3.5
-2.0	0.0	3.0	-3.0	0.0	1.0	-1.0	0.0	-4.0
-0.7	1.0	1.4	-1.4	-1.0	1.4	-1.4	1.0	0.0
-2.1	-1.0	1.4	-1.4	1.0	1.4	-1.4	-1.0	-3.5
-2.0	0.0	1.0	-1.0	0.0	3.0	-3.0	0.0	-1.0
-0.7	0.0	0.0	-0.7	-1.0	2.1	-2.8	0.0	0.7

(b)

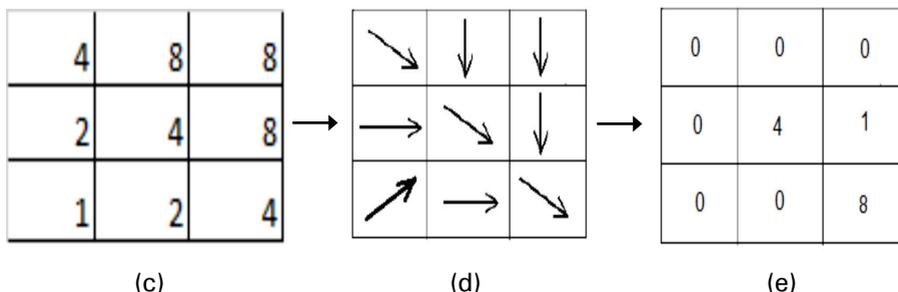


Figura 5. Modelo digital de elevação (a), cálculo para direção do fluxo hídrico (b), codificação da direção do fluxo hídrico (c), representação do fluxo (d), escoamento superficial com base no fluxo hídrico (*runoff*) (d), a partir da precipitação hipotética de 1mm por pixel.

Na Figura 6 é obtido, por célula, o incremento do escoamento superficial na direção e sentido do fluxo (valores Delta). Estes valores indicam o sentido e a segmentação da acumulação hídrica por área que, a partir da orientação do fluxo, é delineada a bacia hidrográfica.

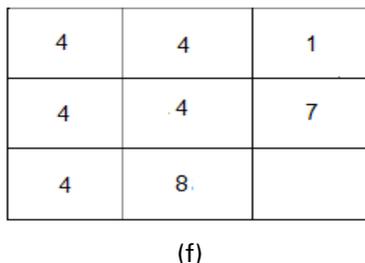


Figura 6. Valores Delta: incremento de escoamento superficial por célula. Cálculo: valor de *runoff* da célula a jusante subtraído pelo valor de *runoff* da célula a montante. O valor calculado é atribuído à célula a montante.

4) Rotulação das Bacias Hidrográficas: esta etapa é referente aos procedimentos do algoritmo para iniciar o processo de identificação dos limites e rotular cada bacia. A partir de um valor de background (-1), os pontos de início de rotulagem de cada bacia são definidos por um limiar, para comparação do valor de Runoff e Delta. Para mais detalhes sobre processo de delimitação de bacias hidrográficas consultar Jenson e Domingue (1988).

Para este trabalho de delineamento de bacias hidrográficas para o Estado

do Rio de Janeiro com os dados do modelo digital de elevação SRTM corrigido, foram realizados testes de delimitação automática de sub-bacias em áreas conhecidas, alterando limiares e comparando-se com as sub-bacias delimitadas manualmente, para verificar a qualidade da geração automática, e sua adequação com a rede de drenagem na escala 1:50.000 (cartas topográficas do IBGE e DSG).

Edição da Delimitação de MBH

A edição foi realizada no software ArcGis, utilizando a base cartográfica do IBGE e DSG na escala 1:50.000.

Após a geração automática foi realizada uma edição vetorial que constituiu em pequenos ajustes à rede hidrográfica e a vetorização de áreas não delimitadas, com um pós processamento para correção de imperfeições na delimitação computacional, e para a eliminação de sub-bacias menores do que 400 ha.

Parâmetros Ambientais em Bacias Hidrográficas (Morfométricos e de Uso/Cobertura da Terra)

A parametrização das sub-bacias foi calculada utilizando combinações de módulos do Idrisi Kilimanjaro. Foram avaliados os parâmetros considerados mais importantes, usuais e exequíveis de extrair, para a escala de trabalho adotada, sendo uma parte do universo de variáveis morfométricas e morfológicas para caracterização de bacias hidrográficas. Uma revisão de variáveis morfométricas pode ser encontrada em Collares (2000).

Densidade de Drenagem (DD)

Este parâmetro é um dos indicadores da vulnerabilidade do solo. Valores baixos de DD podem estar associados a rochas resistentes, solos muito permeáveis ou relevo suave (Rocha, 1991). A densidade de drenagem é dada por:

$$DD(km / ha) = \frac{CD}{A} \text{ sendo}$$

CD = comprimento de drenagem, dado por

$$CD(km) = \sum R + \sum C + \sum T,$$

sendo R=ravinas; C=canais; e T= tributários, em km; e

A = área da sub-bacia, em ha.

Para a resolução do modelo digital de elevação SRTM, a detecção da drenagem não é de grande precisão, processando-se a rede em células de 90 x 90 m, com superestimativas em área, e pelo fato de segmentos de drenagem internos à célula não serem detectados. Para a escala de trabalho proposta (1:100.000) é possível uma estimativa razoável por meio dos procedimentos descritos a seguir. Conforme Eastman (2003), o resultado de escoamento superficial (*runoff*) pode ser reclassificado a partir de um limiar para obter a rede de drenagem, necessário para o cálculo da densidade de drenagem. A rede de drenagem obtida desta forma é imprecisa em continuidade para áreas menos declivosas mas, por outro lado, detecta canais e tributários não considerados na digitalização das Cartas de Levantamento Sistemático produzidas pelo DSG, não padronizadas com relação à drenagem restituída nas cartas do IBGE.

Para estimar o comprimento da rede de drenagem na estrutura raster, foi utilizado o seguinte procedimento: sendo o pixel do modelo digital de elevação SRTM de 90 x 90 metros, a rede de drenagem extraída na estrutura raster é formada por segmentos contínuos de pixels de 90 x 90 m. Um segmento é um conjunto de direções vertical, horizontal ou diagonal, em que cada pixel participa com um comprimento de 90 metros (se a direção for vertical ou horizontal), ou com um comprimento de 127,279 metros, se a direção for diagonal. Desta forma, estima-se o comprimento de drenagem como:

$$CD = n \text{ pixels} * (2 * 90 \text{ m} + 1 * 127,279 \text{ m}) / 3 = n \text{ pixels} * 102,426 \text{ m}$$

Os valores de DD estimados foram comparados com os valores de DD de 13 microbacias da Sub-bacia do Rio Soturno obtidos por Rocha (1991).

Índice de Circularidade (IC)

O IC é um parâmetro que mede a proximidade da forma da bacia ao círculo. Quanto mais próxima da forma circular (próximo de 1), maior o perigo de enchentes na bacia. O IC é dado por:

$$IC = A/A_c$$

Sendo A = área da bacia em ha;

A_c = área do círculo de perímetro igual ao da bacia considerada
($A_c = P^2/4\pi$)

Declividade Média da Sub-bacia (DECL)

A declividade média da sub-bacia é um parâmetro que se relaciona com a aptidão agrícola, a erosão e o risco de enchente. Este parâmetro é resumido por sub-bacia, por meio dos dados de declividade obtidos em Costa et al. (2005).

Coefficiente de Rugosidade (RN)

O coeficiente de rugosidade (Ruggdeness Number – RN) é um parâmetro que indica o uso potencial da terra para agricultura, pecuária e reflorestamento (Pereira Filho e Rocha, 1988, citado por Rocha, 1991). É uma outra abordagem para aptidão agrícola, que não considera os parâmetros de solo e clima. O RN é dado por:

$$RN = DD * DECL$$

Quanto maior o RN, maior será o perigo de erosão na sub-bacia.

Escoamento Superficial (RUNOFF_BH)

O Escoamento Superficial é um parâmetro que indica a contribuição de cada pixel em relação à recepção de água de áreas vizinhas, na direção do fluxo hídrico. O parâmetro indicador da magnitude do Escoamento Superficial para uma sub-bacia é o valor máximo de *runoff*. Para compreender este parâmetro, são apresentados dois exemplos:

Na Figura 7 é dado um exemplo para uma área de captação de 4 pixels, variando da condição completamente plana para o máximo escoamento superficial. Na comparação entre as estatísticas média, total e máximo *runoff*, a média atenua a intensidade real de *runoff* na bacia, enquanto o parâmetro total superestima o runoff, porque acumula o escoamento, chegando a dobrar a quantidade de chuva receptada pela bacia. O parâmetro que informa, na situação mais crítica, o escoamento superficial total da chuva na bacia é o valor máximo. Os 4 mm receptados pela bacia escoam para o pixel inferior direito (foz). O valor máximo de *runoff*, considerando a distribuição da chuva uniforme (1mm/pixel, por exemplo), não é apenas a quantidade de chuva na bacia, por causa da conexão entre bacias a montante e a jusante. Maiores magnitudes de *runoff* expressam bacias com maior recepção de drenagem no contexto de bacias a montante.

Na Figura 8 são apresentadas as estatísticas: média, total e máximo, variando o tamanho da área de captação e drenagem, demonstrando que para sub-bacias com condições topográficas similares, mas de tamanhos diferentes, o valor máximo é proporcional à área, considerando o isolamento da bacia. As condições de abaciamento (situações 1, 2 e 3 na Figura 7, e 1 e 2 na Figura 8) foram representadas apenas para compreensão porque não ocorrem no modelo corrigido, devido ao ajuste de depressões, que faz com que cada pixel tenha uma direção de escoamento.

Cond.	Precipitação (1mm/pixel)		Direção/sentido (esc.sup.)		Runoff		Estatísticas BH		
	Média	Total	Média	Total	Média	Total	Média	Total	Máximo
1	1	1	↻	↻	1	1	1	4	1
	1	1	↻	↻	1	1			
2	1	1	↻	↻	1	1	0.75	3	1
	1	1	→	↘	1	2			
3	1	1	↘	↻	1	1	0.75	3	2
	1	1	→	↘	1	3			
4	1	1	↘	↓	1	2	0.75	3	3
	1	1	→	↘	1	4			

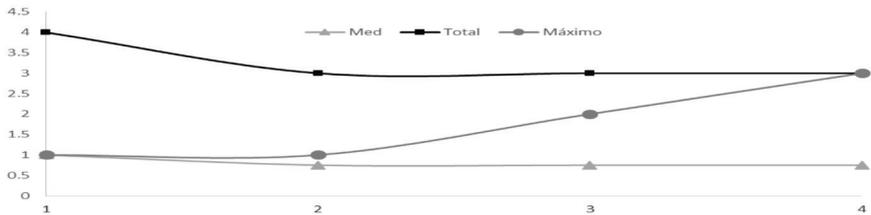


Figura 7. Ensaio de *runoff* e estatísticas para área de captação de 4 pixels com recepção de 1mm de chuva por pixel.

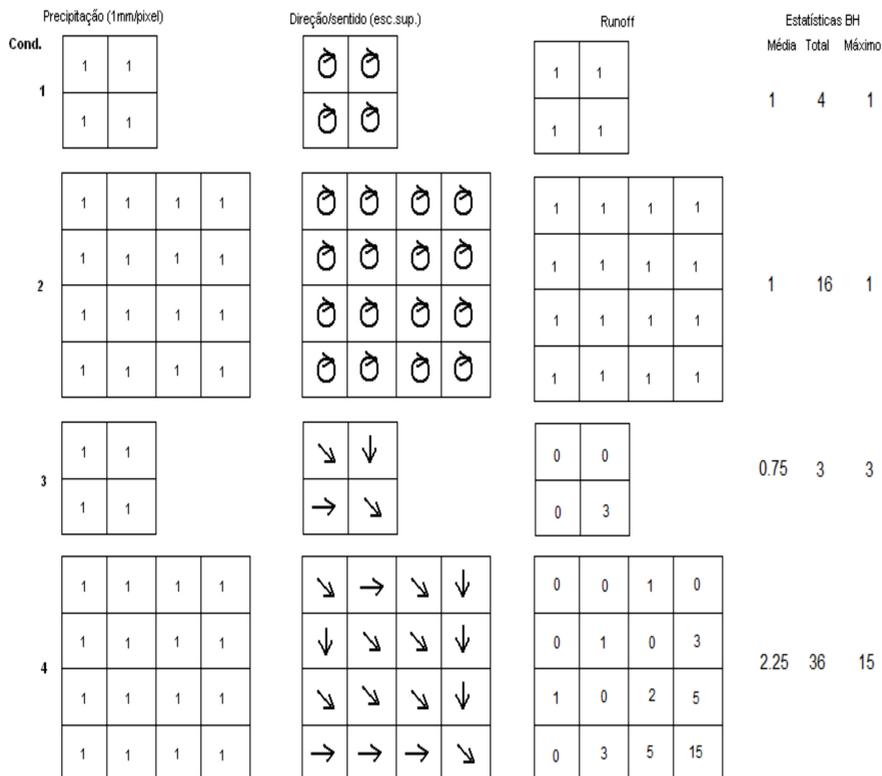


Figura 8. Ensaio de runoff e estatísticas para 2 condições de escoamento, e 2 tamanhos diferentes, com recepção de 1mm de chuva por pixel.

Cobertura e Uso da Terra em Sub-bacias

A proporção de cobertura florestal (COBVEG) foi extraída por sub-bacia (Área Fragmentos/Área Bacia) do mapeamento de remanescentes da Mata Atlântica (Fundação SOS Mata Atlântica, 2002), na escala 1:50.000, delineando fragmentos de, no mínimo, 10 ha.

A proporção das principais classes do uso da terra por sub-bacias, agricultura (AGRIC), pastagem (PAST) e área urbana (URBAN) foi extraída do mapeamento do Uso e Cobertura da Terra (FCIDE, 2005).

Análise Multicritério (AMC) para Indicar Vulnerabilidade Ambiental em Sub-bacias

Uma primeira aproximação da vulnerabilidade ambiental de sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro foi calculada por meio da AMC, com agregação de critérios pelo método da combinação linear de pesos (WLC), em que a variável objetivo (S) é o índice de vulnerabilidade ambiental. E os fatores (x_i) são ponderados por pesos (w_i), conforme seu grau de importância, dado pela expressão:

$$S = \sum w_i * x_i$$

Utilizou-se a AMC para obter um índice de vulnerabilidade que pode ser inferido por um conjunto de fatores que apresentam relações de causa-efeito conforme a aplicação (Mendes, 2001; Fuller, et al., 2002; Costa et al. 2003). Os fatores relacionados com a vulnerabilidade são a densidade de drenagem (DD), o índice de circularidade da bacia (IC), o percentual médio de declividade (DECL), o *RUNOFF_BH* e os parâmetros de uso da terra, percentual de cobertura vegetal (COBVEG), agricultura (AGRIC), pastagem (PAST) e área urbana (URBAN). O *RUNOFF_BH*, mesmo considerando a precipitação uniforme, como foi considerada neste trabalho, não é uma variável integralmente relacionada com a Densidade de drenagem e a declividade média, devido à posição de contexto da bacia, como foi descrito anteriormente. Os índices DD e DECL, embora com valores de correlação de Pearson de 0,76, foram consideradas conjuntamente pelo fato de existirem outros fatores condicionantes da densidade de drenagem, além da declividade, como a geomorfologia.

A atribuição de diferentes pesos (w_i) aos fatores, de acordo com seu grau de importância, é feita com o auxílio da AHP (Analytical Hierarchy Process), permitindo o cálculo dos pesos, conforme os graus de hierarquia entre os mesmos par a par, extraídos de uma escala de 9 pontos (Saaty, 1977).

Os fatores foram transformados de acordo com o objetivo, para que os mesmos sejam correlacionados positivamente. Por causa das diferentes

escalas em que cada fator é mensurado, os fatores foram normalizados para uma escala contínua (1byte) que se estende do valor de menor vulnerabilidade (0) para o valor de maior vulnerabilidade (255). A transformação de valores originais para “índices de vulnerabilidade” foi a linear.

Resultados e Discussão

Na Figura 10 são apresentados os resultados de Densidade de Drenagem (DD) por sub-bacias em km/ha, que foram comparados com os levantamentos detalhados em sub-bacias (Figura 9), demonstrando boa aproximação com os valores gerados neste trabalho. Os pontos em vermelho correspondem a DD e DECL levantados para 13 sub-bacias da Sub-bacia do Rio Soturno (Rocha, 1991).

No Estado do Rio de Janeiro pode se observar que a densidade de drenagem é considerada alta, entre 0.025 e 0.031km/ha, nas regiões pertencentes às Unidades Morfoesculturais dos Maciços Costeiros e Interiores, das Escarpas Serranas (Serra do Mar - Planalto da Bocaina e Serra dos Órgãos) e (Mantiqueira Meridional - Planalto de Itatiaia), com sistemas de relevos de degradação (Figura 10).

A unidade dos Maciços Costeiros e Interiores apresentam vertentes íngrimes, por vezes rochosa, frequentemente coberto com depósito de tálus e colúvios (Dantas, 2001). A unidade das Escarpas Serranas, assim como os Maciços Costeiros, apresentam vertentes muito íngrimes, às vezes rochosas, recobertas por tálus e colúvios, apresentando desnivelamentos bastante elevados de até 2000 m (IBGE, 1983).

Apesar do fato destas unidades apresentarem uma grande propensão a processos erosivos, estes não ocorrem de maneira intensa devido à preservação da cobertura vegetal existente nestas unidades, o que pode ser observado na Figura 17. Porém a expansão urbana (Figura 20) e aumento de atividades agropastoris (Figuras 18 e 19) contribuem para o aumento da vulnerabilidade à erosão nestas áreas.

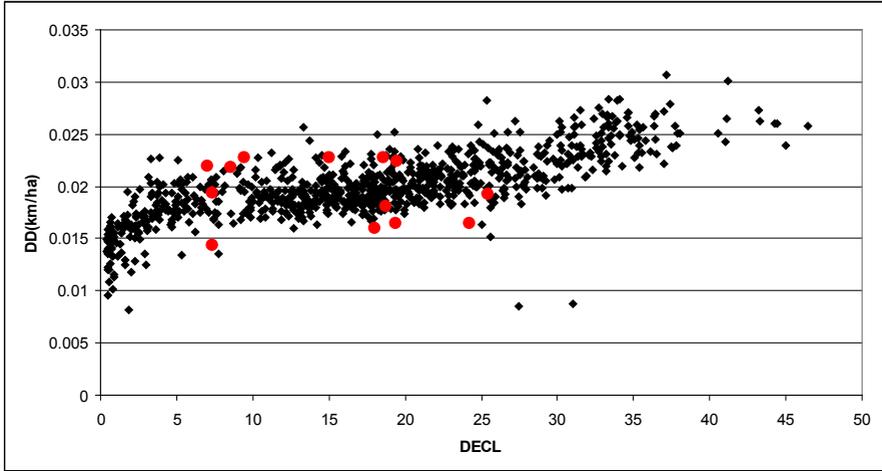


Figura 9. Densidade de Drenagem (DD em km/ha) em função da Declividade média percentual de Sub-bacias Hidrográficas (DECL). Em vermelho, DD e DECL de 13 sub-bacias da Sub-bacia do Rio Soturno
Fonte: Rocha (1991).

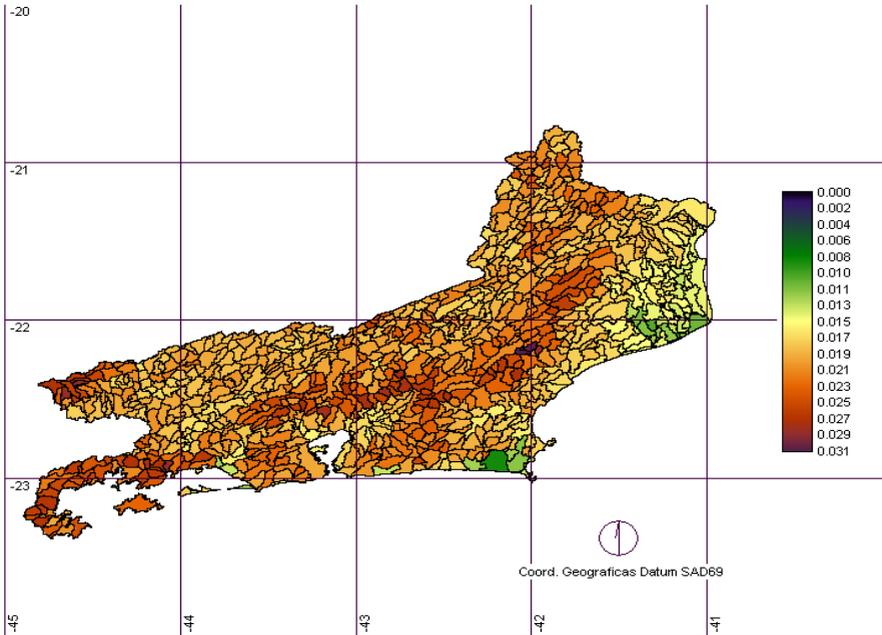


Figura 10. Densidade de drenagem (km/ha) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

Outro fator importante que influencia a densidade de drenagem é a climatologia local. Massas de ar úmido provenientes do oceano, que se dirigem em direção ao continente, ao encontrar escarpas ou montanhas, ascendem e precipitam localmente, gerando chuvas orogênicas, aumentando localmente a vazão de água da chuva. Este fator potencializa o efeito da densidade de drenagem nas regiões supracitadas.

Densidades intermediárias ocorrem nas depressões e alinhamentos de cristas do Paraíba do Sul, incluindo compartimentos planálticos do Leste de Minas, no Noroeste Fluminense e nas Colinas e Maciços Costeiros próximo ao litoral (IBGE, 1983).

Regiões com densidades de drenagens baixas podem ser encontradas na parte litorânea a leste do Estado, constituída das Unidades Morfoes-culturais das Superfícies Aplainadas nas Baixadas Litorâneas, Planícies Costeiras e Tabuleiros de Bacias Sedimentares, com sistemas de relevo de degradação.

As Superfícies Aplainadas nas Baixadas Litorâneas apresentam relevos suaves e uniformes, com colinas amplas, baixas e niveladas (Dantas, 2001). Os Tabuleiros de Bacias Sedimentares apresentam colinas tabulares de topo plano, de amplitude de relevo muito baixa. As Planícies Costeiras compreendem um relevo muito suave, predominantemente arenoso. Em todas estas unidades ocorre a predominância de terrenos sedimentares, onde raramente aflora o substrato rochoso, isto faz com que a transmissibilidade do terreno seja alta, diminuindo assim a densidade de drenagem nestas regiões (IBGE, 1983).

Estas unidades apresentam um baixo potencial de vulnerabilidade aos processos erosivos e movimentos de massa devido as suas declividades pequenas e ao seu relevo suave.

Para o índice de circularidade, apresentado na Figura 11, não se observou uma associação entre o formato da bacia e a geomorfologia, com a distribuição de bacias tendendo para o formato circular em quase todas as formações no Estado do Rio de Janeiro, com exceção do norte fluminense, com depósitos sedimentares (planícies e tabuleiros), onde predomina a forma alongada de bacias hidrográficas.

A declividade média (%) por sub-bacia é apresentada na Figura 12. As sub-bacias com menor declividade encontram-se na faixa de elevação entre 0 e 50 m (Figura 13), onde ocorrem as maiores intensidades de ocupação urbana e atividades agrícolas (Figuras 18 e 20).

O índice de rugosidade (Figura 14) é um indicador de aptidão agrícola para sub-bacias, que considera somente fatores topográficos (densidade de drenagem e declividade), não abordando outros fatores que condicionam a agricultura, como solo e clima. Sua finalidade é a de indicar a vulnerabilidade da bacia às práticas agrícolas, ou seja, quanto maior o RN, mais restrita é a bacia para seu uso com agricultura, que irá exigir sistemas de produção (sistemas agroflorestais ou silvicultura, por exemplo) e práticas conservacionistas adaptadas às restrições topográficas, como o cultivo mínimo, plantio em curvas de nível, etc. As bacias com menor RN também predominam na faixa de 0 a 50 metros.

Na Figura 15, o *runoff* foi categorizado em 16 classes (a), o que permite visualizar baixos valores; e em escala contínua (b), com a visualização do *runoff* de maior magnitude. Na Figura 16, são apresentados exemplos de alta magnitude de *runoff* comparados com a composição colorida Landsat 5 (NASA, 2005).

No Norte Fluminense ocorre a maior magnitude de *runoff* com escoamento em direção à Lagoa Feia e para o oceano na Bacia de Campos. Nesta mesma região ocorre uma concentração de sedimentos na faixa litorânea observada na imagem de satélite, relacionada talvez com processos de regressão marinha, influência de correntes e também com o potencial de escoamento hídrico do continente, provocando uma discussão no campo da oceanografia e geologia (Figuras 15 e 16).

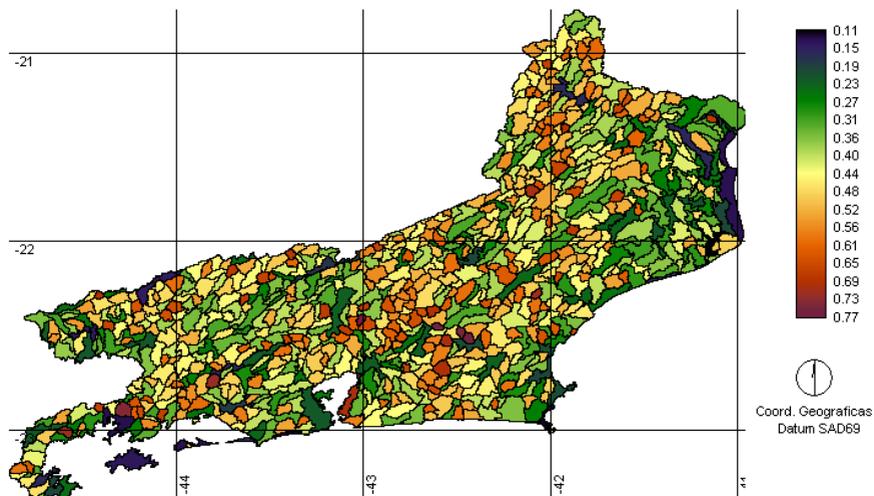


Figura 11. Índice de Circularidade (0-1) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

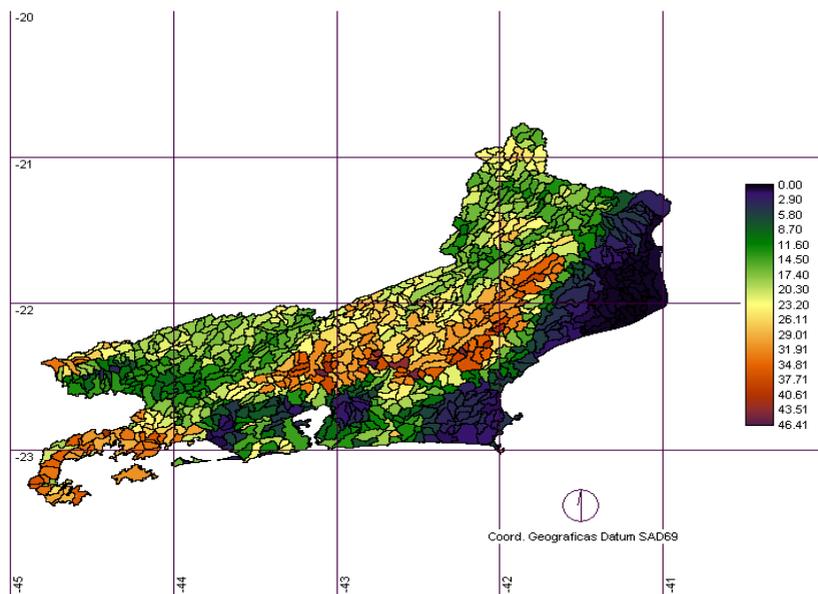


Figura 12. Declividade média em percentagem para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

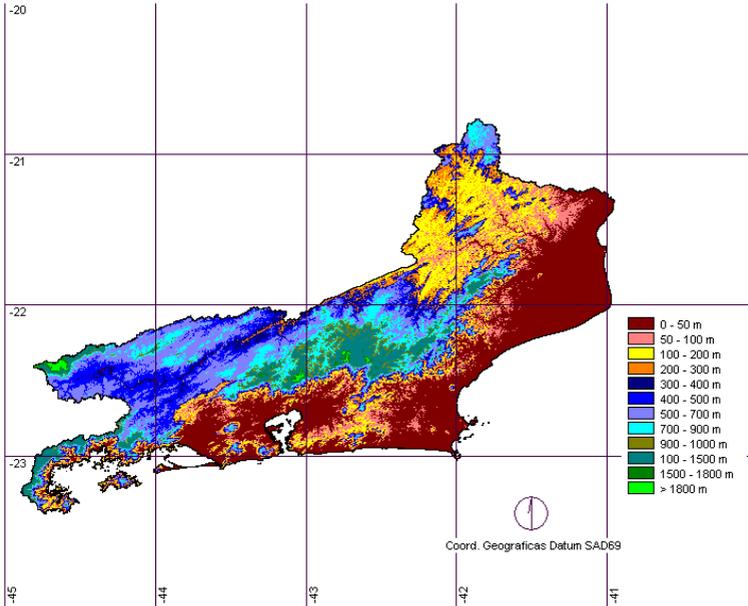


Figura 13. Classes de Altitude do DEM SRTM para o Estado do Rio de Janeiro.
Fonte: Costa et.al. (2005).

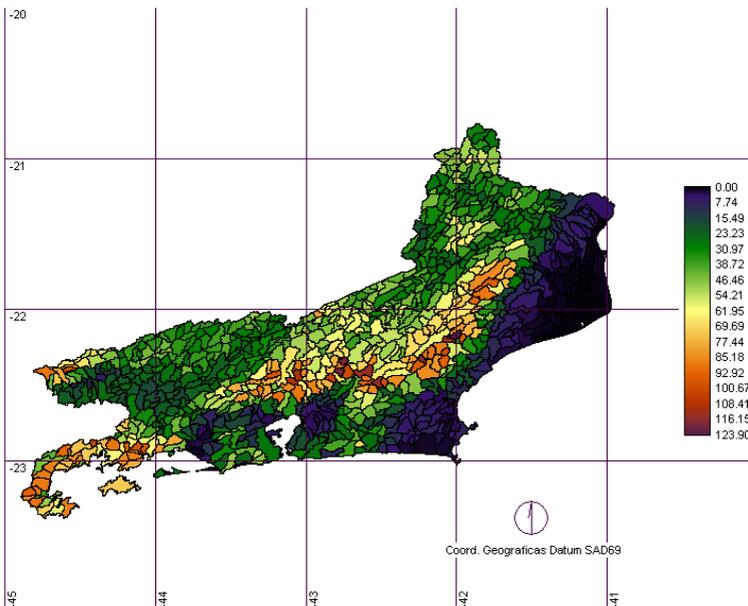


Figura 14. RN*100 para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

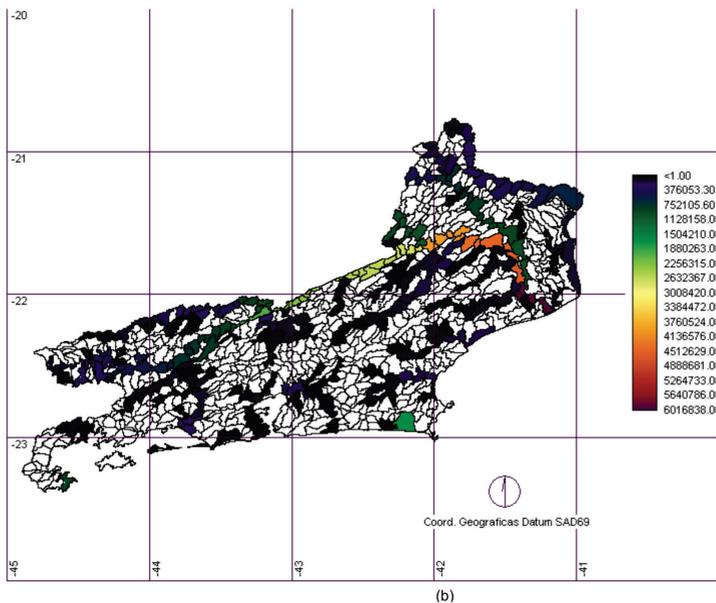
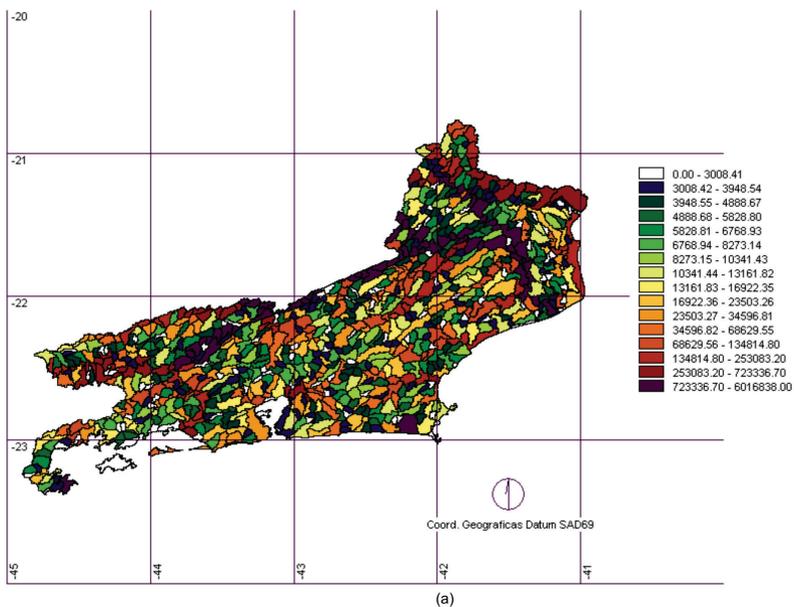


Figura 15. *Runoff* para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro (1mm/ 90x90m) (a) Quantização de *runoff* em 16 classes; (b) *Runoff* em escala contínua.

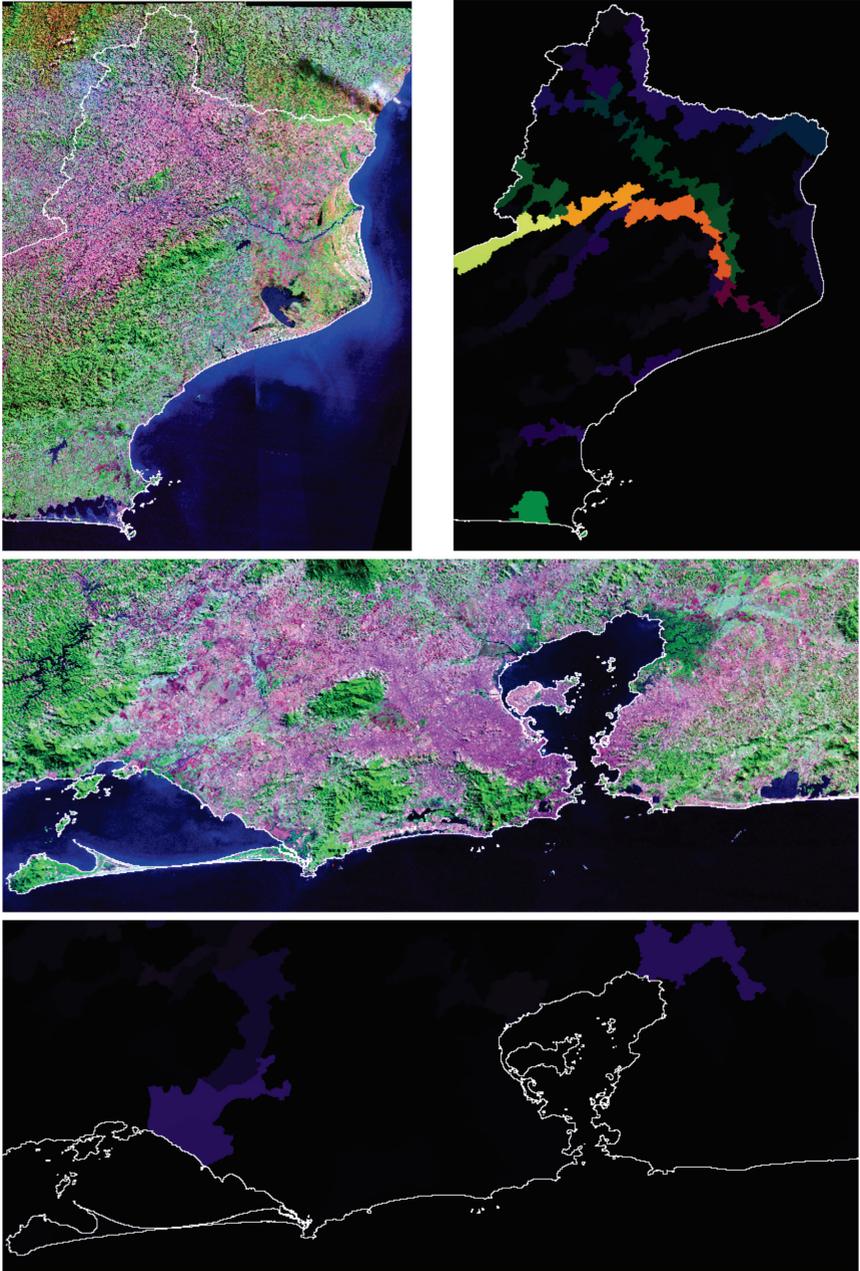


Figura 16. *Runoff* com a respectiva composição colorida RGB 543 Landsat 5 (1990).
Fonte: Zulu Nasa.

Outro *runoff* com alta magnitude ocorre nos cordões arenosos, no Delta do Paraíba do Sul. Valores de *runoff* moderados podem ser observados, com saída para o manguezal de Guapimirim, ainda preservado, que serve como um dissipador de energia, depositando sedimentos antes de atingir a Baía de Guanabara. Outra região é a da Baía de Sepetiba, onde se observa também alguma suspensão de sedimentos. Outras áreas de maior magnitude de *runoff* estão com baixa cobertura vegetal, como o Noroeste Fluminense e a Bacia do Paraíba do Sul, onde ocorrem altos valores, como na região de Três Rios, observada na Figura 15 (b).

Outro fator importante na vulnerabilidade de bacias hidrográficas é a ausência da cobertura vegetal, principalmente em áreas críticas, como as de preservação permanente, definidas pelo Código Florestal Lei 4.771 de 1965, no Artigo 2. Na Figura 17 é apresentado o percentual de fragmentos nas bacias hidrográficas. As bacias com até 19.99% de cobertura vegetal (em branco) podem ser consideradas críticas, prioritárias em programas de reflorestamento e adequação à legislação, enquanto as classes acima de 20% podem atender ao computo de reserva legal exigido pelo Código Florestal na região Sudeste (não consideradas as áreas de preservação permanente).

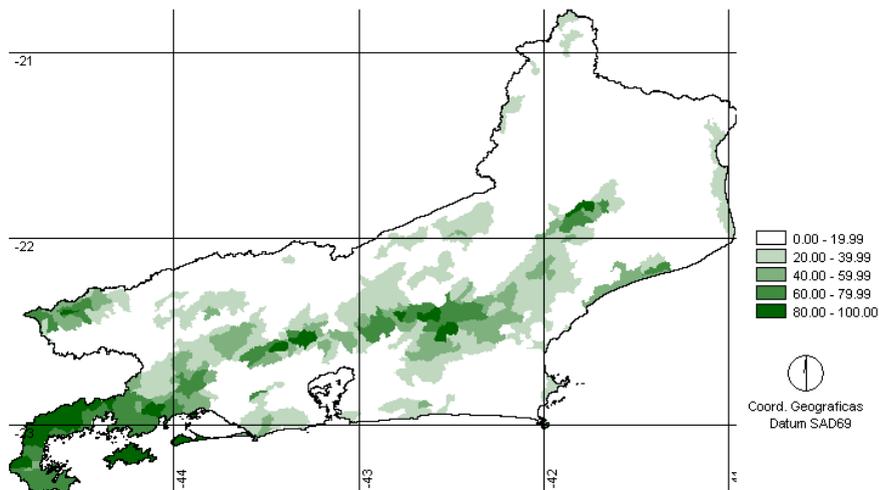


Figura 17. Proporção de áreas com remanescentes florestais (COBVEG) extraídas do Mapeamento da Cobertura da Terra (SOS Mata Atlântica, 2000) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

A agricultura é um dos principais fatores de degradação, devido à exposição do solo e seu manejo, que expõe o solo à erosão hídrica, afeta a estrutura e reduz a matéria orgânica. As áreas com ocorrência de agricultura (Figura 18) distribuem-se na região norte fluminense, com o predomínio da lavoura de cana de açúcar, em Cachoeira de Macacu, com olericultura, milho, etc., na região Serrana, também com olericulturas, na região de Silva Jardim, Casimiro de Abreu e em Mangaratiba. O Mapeamento realizado com imagens Landsat é comparado com a estatística municipal do censo agropecuário para verificação de aproximação entre os dois levantamentos.

As áreas com pastagens, relativamente menos impactantes do que áreas agrícolas, também constituem um fator de vulnerabilidade, pois em manejos inadequados e em áreas inaptas são causa de compactação e perda da fertilidade do solo, resultando em processo erosivo, como ravinações, erosão laminar e até voçorocamentos. As áreas com pastagens (Figura 19) distribuem-se por todo o Estado do Rio de Janeiro, com exceção de uma área onde o domínio é da agricultura, no Município de Campos. Sua maior concentração é a região noroeste fluminense, região dos Lagos e o Vale do Paraíba do Sul.

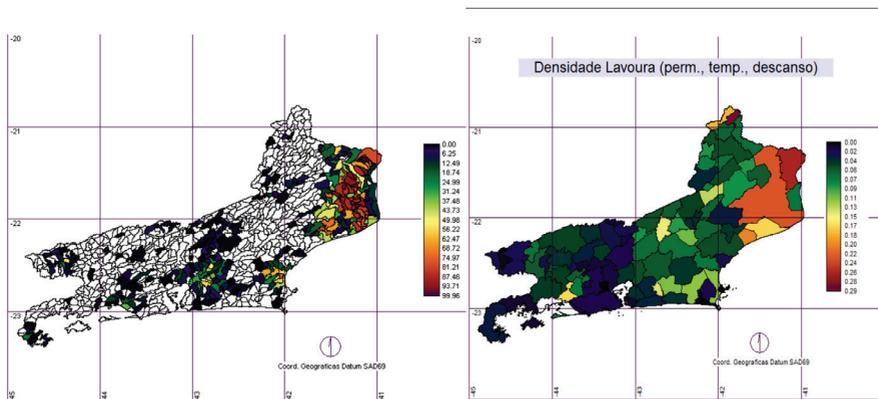


Figura 18. Proporção de áreas com agricultura extraídas do Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra (FCIDE, 1994) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro (a) e por Municípios do Censo Agropecuário de 1995 (b) (IBGE, 1996).

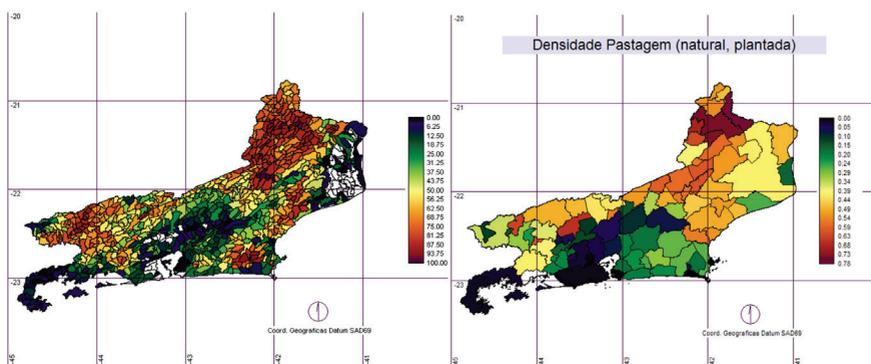


Figura 19. Proporção de áreas com pastagens (PAST) extraídas do Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra (FCIDE, 1994) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro (a) e por Municípios do Censo Agropecuário de 1995 (b) (IBGE, 1996).

As áreas urbanas têm impactos potenciais em bacias hidrográficas, exigindo ações corretivas pontuais, com uma gestão ambiental distinta do espaço rural. A impermeabilização do solo (aumentando o risco de enchentes), a ocupação em áreas com risco de deslizamento e a disposição de resíduos urbanos e industriais são alguns dos problemas relacionados com a vulnerabilidade em bacias hidrográficas urbanas. As bacias com ocorrência de áreas urbanas (Figura 20) correspondem à região metropolitana do Rio de Janeiro, região dos Lagos e de Angra, Bacia de Campos, região Serana, Vale do Paraíba e demais núcleos urbanos espalhados pelo estado.

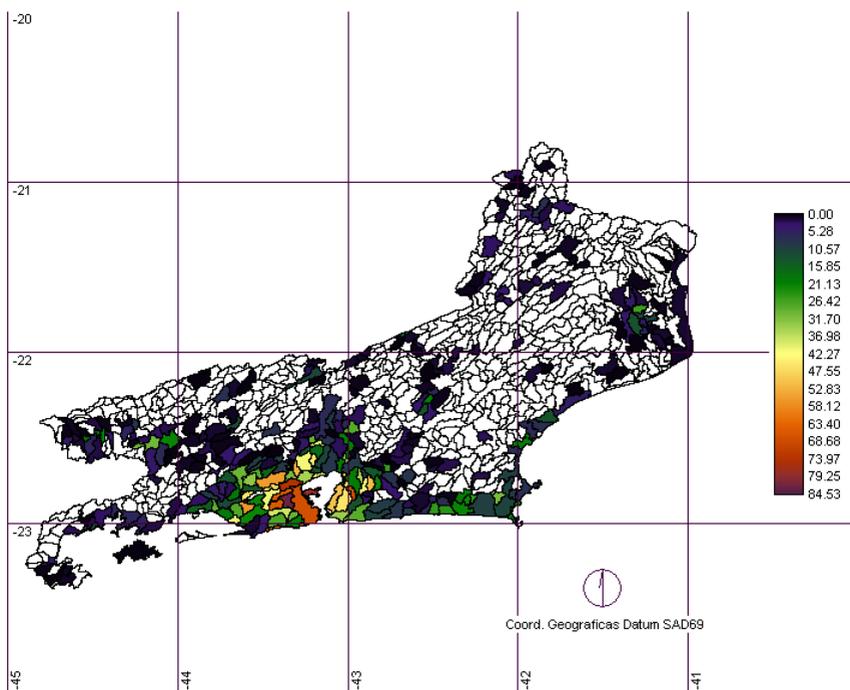


Figura 20. Proporção de áreas urbanas (URBAN) extraídas do Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra (FCIDE, 1994) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

Análise Multicritério (AMC) para Indicar Vulnerabilidade Ambiental em Sub-bacias

Os indicadores Densidade de Drenagem (DD), Índice de Circularidade (IC), Declividade Percentual Média (DECL), Escoamento Superficial Máximo (*RUNOFF_BH*), Percentuais de Cobertura Vegetal (COBVEG), Áreas Agrícolas (AGRIC), Áreas com Pastagens (PAST) e Áreas Urbanas (URBAN) foram hierarquizados de acordo com o grau de importância de vulnerabilidade ambiental (Tabela 1). O IC e PAST foram considerados os fatores de menor importância, e DD, DECL, *RUNOFF_BH*, AGRIC, URBAN e COBVEG foram considerados de maior importância. Seus pesos finais foram atribuídos pela técnica AHP (Analytical Hierarchy Process), que calcula pesos para cada fator, conforme os graus de hierarquia entre os mesmos par a par, extraídos de uma escala de 9 pontos (Saaty,

1977). A AHP gera também um índice de consistência (Eastman, 2003). Caso não seja atendido o limiar mínimo de consistência, a hierarquização precisa ser refeita. Os respectivos pesos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Hierarquia de importância entre os fatores relacionados com a vulnerabilidade ambiental de sub-bacias hidrográficas.

	DD	IC	DECL	RUNOFF_BH	COBVEG	AGRIC	PAST	URBAN
DD	1							
IC	1/3	1						
DECL	1	3	1					
RUNOFF_BH	1	3	1	1				
COBVEG	1	3	1	1	1			
AGRIC	1	3	1	1	1	1		
PAST	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1	
URBAN	1	3	1	1	1	1	3	1

A transformação linear dos fatores para 256 níveis segue a relação de pertinência de cada fator, sendo a proporção de cobertura vegetal o único fator com relação inversa à vulnerabilidade ambiental (Tabela 2).

Tabela 2. Pesos e relações de pertinência para os fatores utilizados na integração temática para Vulnerabilidade Ambiental de MBH, resultantes da técnica AHP (Razão de Consistência = 0.01).

Nível	Fator	Peso Final	Relação de Pertinência
1	<u>Vulnerabilidade Ambiental</u>		
2	DD	0.15	+
2	IC	0.05	+
2	DECL	0.15	+
2	RUNOFF	0.15	+
2	COBVEG	0.15	-
2	AGRIC	0.15	+
2	PAST	0.05	+
2	URBAN	0.15	+

O resultado da Análise Multicritério com os pesos estabelecidos na Tabela 2 é apresentado na Figura 21. As bacias mais vulneráveis concentram-se nas regiões Noroeste e Norte do estado, sendo que as que apresentaram maior grau de vulnerabilidade acompanham o Rio Paraíba do Sul da região central do estado até sua foz, sendo considerada, portanto, uma indicação de áreas para programas de recuperação ambiental.

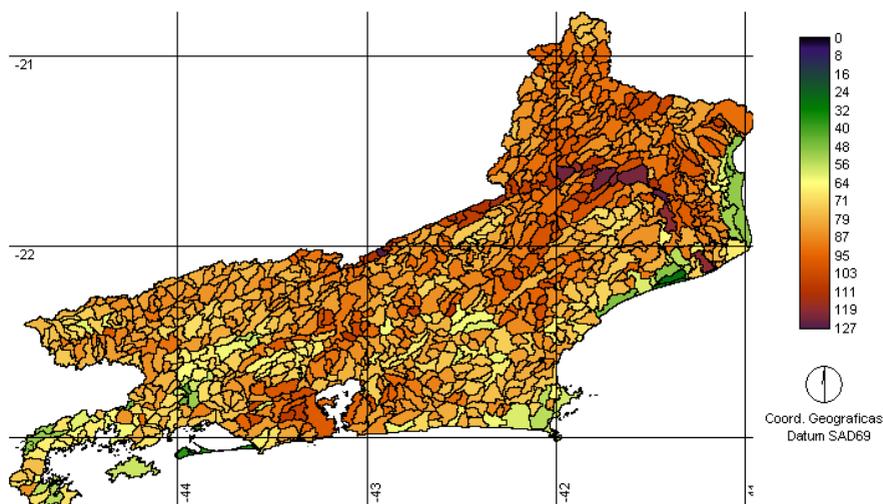


Figura 21. Índice de Vulnerabilidade Ambiental para Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

Considerações Finais

Os resultados obtidos são objeto de uso/validação para potenciais usuários da informação e espera-se que possam subsidiar/orientar ações de conservação no Estado do Rio de Janeiro, com uma abordagem por sub-bacias hidrográficas, onde se propôs avaliar a vulnerabilidade destes compartimentos naturais, que serão integrados a outros componentes relacionados ao conflito Conservação x Uso da Terra. Com estas e outras análises, o propósito é a orientação para estratégias e ações para recuperação/conservação da Floresta Atlântica considerando fatores ambientais e socioeconômicos, que interferem no uso da terra.

Referências

- COLLARES, **Avaliação de alterações em redes de drenagem de sub-bacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: Aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari-SP**. Campinas: São Carlos, 2000. 211p. (Tese de Doutorado).
- COSTA, T. C. C.; SOUZA NETO, N. C.; OLIVEIRA, M. A. J.; ACCIOLY, L. J. O. Estimativa da diversidade florística da caatinga por meio da análise multicritério. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 5-10 abr. 2003, Belo Horizonte. [Anais...] Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2689-2696. (CD-ROM).
- COSTA, T.C.C.; SANTOS, P. R. A.; GUIMARÃES, S.P. **Extração de variáveis topográficas do modelo digital de elevação SRTM para o Estado do Rio de Janeiro**. Embrapa Solos. Documentos n. 76, 2005.
- EASTMAN, J. R. **IDRISI Source Code 1987-2003**. Worcester: Clark University, 1987-2003. 1 v.
- EASTMAN, J. R.; JIN, W.; KYEM, P. A. K.; TOLEDANO, J. Raster procedures for multi-criteria, multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 61, n. 5, p. 539-547, 1995.
- FULLER, D.; JEFFE, M.; WILLIAMSON, R. A.; JAMES, D. Satellite remote sensing and transportation lifelines: safety and risk analysis along rural Southwest roads. In: ISPRS COMMISSION I SYMPOSIUM 2002, Denver.; MID-TERM SYMPOSIUM AIN CONJUNCTION WITH PECORA 15 LAND SATELLITE INFORMATION, 4., 10 – 15 Nov. 2002. **Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale**. Denver, CO: ISPRS, 2002. Disponível em: <http://www.isprs.org/commission1/proceedings/paper/00089.pdf>. Acesso em: 06 maio 2005.
- Fundação SOS Mata Atlântica e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2002) Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica: período 1995-2000. **Relatório Final**.
- GALVÃO W.S.; MENESES P.R.; Avaliação do Sistema de Classificação e Codificação das Bacias Hidrográficas Brasileiras para Fins de Planejamento de Redes Hidrométricas. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2511-2518.
- FCIDE homepage** <http://www.cide2.rj.gov.br/produtos.php?tipo=mapa>. Acesso em 10 de outubro de 2005.

HORA A.; TEUBER W. Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses. Projeto PLANÁ-GUA SEMADS / GTZ de Cooperação Técnica Brasil – Alemanha. Maio, 2001

IBGE. **Censo agropecuário – Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 1996. 1 v. (Recenseamento geral do Brasil-1995. Série regional).

IBGE. **Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro / Vitória**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. 775 p. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 32).

JENSON, S.; DOMINGUE, J., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54:11, 1593-1600.

MEIRELLES M.S.P.; BUENO M.C.D.; DIAS T.C.S.; COUTINHO H.L.C.; Sistema de Suporte a Decisão para Avaliação do Risco de Impactos Ambientais em Bacias Hidrográficas por Rede de Dependência e Lógica Fuzzy. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2259-2266.

MENDES, J. F. G.; MOTIZUKI, W. S. Urban quality of life evaluation scenarios: the case of São Carlos in Brazil. **CTBUH Review**, University of Illinois at Urbana-Champaign, v. 1, n.2, p.13-23, 2001.

MILANI, J. R.; CANALI, N. E. O sistema hidrográfico do rio Matinhos: uma análise morfométrica. **R. RA'EGA**, Curitiba, UFPR, n. 4, p. 139-152. 2000.

NASA homepage <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl> Acesso em 01 de março de 2005.

RIBEIRO, J. C.; SALOMÃO, F. X. T. Abordagem morfopedológica aplicada ao diagnóstico e prevenção de processos erosivos na bacia hidrográfica do alto rio da casca, MT São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 22, n. 1, p. 83-95, 2003.

ROCHA, J. S. M. Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas. Santa Maria: UFSM, 1991. 181p.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, New York, v.15, p. 59-62, 1977.

TEIXEIRA A.J.A; CRUZ C.B.M.; Classificação de Bacias de Drenagem com o Suporte do Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento- o Caso da Baía de Guanabara. ; **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2779-2786.