UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

Camila Cerdeira Dias

VOLUME I

AVALIAÇÃO GEOAMBIENTAL DA REGIÃO DO MÉDIO RIO GRANDE

São Carlos – SP

2013

Versão Corrigida – Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

Camila Cerdeira Dias

AVALIAÇÃO GEOAMBIENTAL DA REGIÃO DO MÉDIO RIO GRANDE

VOLUME I

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

São Carlos – SP

2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

D541
a Dias, Camila Cerdeira
Avaliação Geoambiental da região do Médio Rio Grande / Camila Cerdeira Dias; orientador Osni José Pejon. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Disponibilidade hídrica. 2. Inundação. 3. Potencial de escoamento superficial. 4. Sensoriamento remoto. 5. Geoprocessamento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **CAMILA CERDEIRA DIAS**.

Título da dissertação: "Avaliação geoambiental da região do Médio Rio Grande".

Data da defesa: 01/11/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Osni José Pejon** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof^a. Dr^a. **Ana Carina Zanollo Biazotti Collares**
(Fundação de Ensino Superior de Passos/FESP)

Aprovada

Prof^a. Dr^a. **Denise Balestrero Menezes**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedico este trabalho:
Aos meus pais, Amauri e Valéria,
exemplos de vida
À Júlia com todo meu amor

Agradecimentos

Ao professor Osni Pejon, pela orientação, amizade e valiosa contribuição para minha formação e amadurecimento profissional, muito obrigada.

Aos professores Eduardo Collares e Carina, amigos e orientadores durante a graduação, agradeço pelas oportunidades; sem eles não estaria aqui aonde cheguei. Além disso, agradeço pela confiança depositada em mim e no meu trabalho, pelo incentivo e auxílio no desenvolvimento de pesquisas e pelo apoio na realização desta.

Agradeço a toda à equipe do projeto “Grande Minas – União pelas Águas” (Bruna Marques, Rômulo, Camila, Sirleno, Joyce, Marcelo, Roberlei, Liz, Tereza Cristina, Daniele Marchete, Fernandas, Anas, Léo’s, Isis, Jéssicas, Rodolfo, Thais, Elias, Amanda e Daniela) pelas indispensáveis contribuições na preparação do banco de dados e dos documentos cartográficos.

Agradeço a todos os funcionários do Departamento de Geotecnia, em especial ao Álvaro, à Maristela, à Neiva, ao Herivelto, ao Oscar, ao Sr. Antônio, ao José Luís, ao Décio e à dona Benê, por toda imprescindível atenção dispensada.

Aos professores do Departamento de Geotecnia agradeço pela contribuição no aprendizado durante o mestrado. Em especial agradeço ao professor Lázaro Zuquette pela amizade, dicas e pelos bons momentos de bate papo “nada geotécnicos” e ao professor Oswaldo pelas colaborações com o uso dos softwares de geoprocessamento.

Aos professores Rogério, Oswaldo, Valéria e Osni, muito obrigada pelas oportunidades de atuação nos estágios, muito enriquecedores, em docência no ensino superior.

Aos professores Frederico Mauad (CRHEA-USP), Camilo Rennó, Alexandre Corpentino (INPE), Tony Sampaio (UFPR) e Fernando Pruski (UFV), obrigada pela atenção dispensada e materiais disponibilizados.

Agradeço aos meus amigos que, de forma direta ou indireta, fizeram parte desta fase tão importante da minha vida. A todos os alunos do Departamento da Geotecnia, em especial à minha turma, muito obrigada, pela troca de informações e conhecimentos e pela preciosa

convivência. Em especial agradeço à Patrícia e ao Jean por me socorrer prontamente sempre que precisei de um “help”.

A todos os amigos, mapeadores e “agregados”, em especial a Cláudia Rota, Simone Furegatti, Ju, Camilete, Ligia, MP e Moisés muito obrigada pela troca de conhecimentos, incentivos e muitos momentos de alegrias, que tornaram essa caminhada mais tranquila em diversos momentos.

Agradeço aos amigos Bruno Medeiros, Filipe Biaggioni, Jaque pela valiosa amizade ao longo dessa caminhada.

Ao meu irmão de coração, Rômulo Magri, muito obrigada pela amizade, de longa data, companheirismo e troca de conhecimentos em todas as etapas em que convivemos.

À Janaína Maia e Helianara Santana, muito obrigada pelo apoio e amizade verdadeira.

Agradeço a Cassinha, Mah, Amandinha e Camila pelos bons momentos de convivência e amizade ao longo desta caminhada. À dona Rosa, à Lu, à Eliane, à Elisangela, ao Rafa e aos Allans, muito obrigada pelo acolhimento e amizade na fase final deste trabalho.

Agradeço a professora Neda pelas preciosas dicas de gramática e redação para elaboração desta publicação.

Agradeço pela disponibilização de dados de monitoramento hidro-climatológico às seguintes instituições: INMET, Furnas Centrais Elétricas, COOXUPÉ, COOPARAÍSO, Votorantin e ANA.

Agradeço à USP e ao Departamento de Geotecnia pela oportunidade de aprimoramento profissional e pelo apoio financeiro na participação de eventos.

Ao CNPQ e ao FIDRO agradeço pelo amparo à pesquisa e pelo apoio financeiro.

À Júlia, aos meus pais, às minhas irmãs e aos meus avós, agradeço e dedico este trabalho por me estimularem no desenvolvimento de minha vida profissional, por entender os momentos de ausência e permanecerem sempre ao meu lado, apoiando e incentivando minhas decisões.

“Não sei como pareço aos olhos do mundo, mas eu mesmo vejo-me como um pobre garoto que brincava na praia e se divertia em encontrar uma pedrinha mais lisa uma vez por outra, ou uma concha mais bonita do que de costume, enquanto o grande oceano de verdade se estendia totalmente inexplorado diante de mim.”

Isaac Newton

Resumo

DIAS, C. Cerdeira. **Avaliação geoambiental da região do Médio Rio Grande**. 436p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

A avaliação ambiental de bacias hidrográficas, em nível de detalhe, que viabilize ações efetivas de planejamento, ainda carece de metodologia adequada. Este trabalho norteou-se em realizar uma avaliação geoambiental, com enfoque na compreensão dos padrões dos principais componentes do ciclo hidrológico e de ocupação territorial. Adicionalmente, buscou desenvolver uma metodologia para análises visando ao gerenciamento de bacias hidrográficas.

A pesquisa foi desenvolvida na região do Médio Rio Grande (GD7), com área de drenagem de 9800km², localizada no sul do estado de Minas Gerais. A metodologia está dividida nas etapas de análises: básicas, integradas e finais. Em todas as etapas, um grande volume de informações foi adquirido, armazenado, processado e analisado, com auxílio de geotecnologias (incluindo: GPS, imagens orbitais e ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento disponíveis nos softwares ENVI, ArcGIS e TerraView), consideradas indispensáveis.

A etapa de análises básicas envolveu a aquisição e a avaliação de informações consideradas fundamentais, como uso e ocupação, clima, fluviometria e geomorfometria.

Na segunda etapa, efetuou-se uma análise integrada de dados, adquiridos na etapa anterior, o que permitiu a avaliação de: a) potencialidades morfométricas à ocorrência de cheias relâmpago, inundação de planícies e a regularização de vazões; b) potencialidades dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial; e c) de demandas hídricas potenciais.

A análise de potencialidades de escoamento superficial procurou compreender a influência dos componentes do meio físico e da ocupação territorial nesse processo. Adicionalmente, testou-se uma nova metodologia que demonstrou ser uma forma mais automatizada e padronizada de obtenção de um documento cartográfico, a partir de índices geomorfométricos, que demarca grandes unidades com padrões de escoamento homogêneos.

Nas análises finais (3ª etapa), associaram-se informações, obtidas tanto nas análises básicas quanto nas análises integradas, definindo-se assim regiões com diferentes potencialidades quanto à disponibilidade hídrica e excedentes hídricos (relacionadas às cheias relâmpago e inundação de planícies).

Os parâmetros geomorfométricos ICCD, ICR, ICGC e HAND demonstraram bons resultados e perspectiva futura para o mapeamento, mais ágil e padronizado, de regiões hidrológica, ecológica e geomorfologicamente distintas.

As bacias afluentes da margem direita do Rio Grande apresentam as maiores potencialidades à ocorrência de cheias relâmpago. Enquanto que, na porção à esquerda, a alta potencialidade ocorre em áreas específicas como nas bacias do Ribeirão São Pedro e do Rio Santana, onde, em função da ocorrência de áreas urbanas (municípios de Jacuí, Pratápolis, Passos, Itaú de Minas e Pratápolis), leva a altos níveis de risco decorrentes da inundação.

Os parâmetros do ciclo hidrológico apresentam uma nítida sazonalidade anual e uma alternância interanual (geralmente de 3 em 3 anos) com padrões de mais secos e úmidos. A porção sudeste da GD7 apresenta menor disponibilidade hídrica, enquanto os maiores níveis potenciais encontram-se nas porções norte e sudoeste. As perdas de água por evapotranspiração constituem a parcela mais significativa de demanda hídrica (51% do total precipitado). A demanda azul é baixa quando comparada a valores encontrados na bacia do Paraná e em relação à disponibilidade hídrica da área de estudo, contudo há probabilidade de ocorrência de períodos de deficiência hídrica, há “hot spots” de demanda quali e quantitativa nas proximidades das áreas urbanas de São Sebastião do Paraíso, Passos e Itaú de Minas, principalmente nas bacias afluentes do rio Santana.

Palavras chave: Disponibilidade hídrica, Inundação, Potencial de escoamento superficial, Sensoriamento remoto, Geoprocessamento

[de acordo com o Vocabulário Controlado do SIBi/USP (USP, 2006)]

Abstract

DIAS, C. Cerdeira. **Geoenvironmental assessment in the middle course of Rio Grande river-BR**. 436p. Dissertation (Master in Geotechnical Engineering). Graduate Program in Geotechnical Engineering. São Carlos School of Engineering. University of São Paulo. São Carlos, 2013.

Environmental assessment of hydrographic basins addressing their effective management still lacks of an adequate method. In this research a geoenvironmental assessment has been performed focusing on the understanding of the behavior of the main components of the hydrological cycle and the landuse. Beyond, it was intended to develop a method directed to manage hydrographic basins. The method consists in three basic stages of analysis: basic, integrated and final.

The study area was established on the middle course of the Rio Grande river (GD7) located at the south of the Minas Gerais state in Brazil. The GD7 region is a hydrologic resource administration unit with 9800 km² of drainage area and it is managed by the CBH-GD7. Then, a considerably large volume of information was acquired, stored, processed and analyzed with the aid of geotechnologies like GPS, satellite images and remote sensing tools available in commercial software packages (ENVI, ArcGIS and TerraView). These tools were essential to successfully reach the expected results in this method.

The basic analysis stage consisted on data acquisition and on the analysis of key information like landuse, weather, fluviometric and geomorphometry.

At the second stage, it was made an integrated analysis of the available data. This analysis allowed assessing (a) morphometric potentialities to flash flood, plain inundation and flow regularization (b) runoff potentialities of the physical and anthropic environment (c) potential hydric demands.

The analysis of potential runoff aimed to understand the influence of the components of the physical environment and the landuse in this process. Additionally, it was tested a new method to delimitate large units with homogenous runoff patterns. This method showed to be faster and easier than the classic methods to performing cartographic documents with base on geomorphometric indexes.

Into the third stage –final stage- output data from basic and integrated analysis were integrated again to define regions with different flow potentials associated to flash flood and plain inundation.

The geomorphometric parameters ICCD, ICR, ICGC and HAND demonstrated satisfactory results and also, the integration of these models showed to be a faster and easier way to map regions with ecologic and geomorphometric differences.

The tributary basins of the right margin of the Rio Grande river showed higher flash flood potential. Meanwhile, in the left margin high potential of flood occurs in some urban areas as those of São Pedro stream and Santana river basins (municipalities of Jacui, Passos, Itaú de Minas and Pratápolis). The presence of these potential hazards in urban areas can generate risks associated to the occurrence of floods.

The parameters of the hydrologic cycle showed dry and wet seasonality along the year and a 3-year interval period with hydrologic extremes. The southeast portion of GD7 presented a the smaller hydric availability. In the other hand, the largest levels of hydric potential were located at the north and southwest portions.

The water losses due to evapotranspiration constitute the most significant portion of the hydric demand (51% of the precipitation). The blue water footprint is low when compared to the values of the same parameter found at the Paraná basin and also when compared to the hydric availability of the study area. Nevertheless, there exists a probability of occurrence of periods of hydric deficiency. Moreover, there were found 'hot spots' of qualitative and quantitative demand on the São Sebastião do Paraíso, Passos and Itaú de Minas urban areas. The demands affect mainly the tributary basin of the Santana river.

Keywords: Hydric availability, Flood, Potential runoff, Remote sensing, Geoprocessing

[According to Vocabulário Controlado do SIBi/USP (USP, 2006)]

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Esquema das principais linhas metodológicas para elaboração de mapas geoambientais (CENDRERO e DÍAZ de TERÁN apud CENDRERO, 1990).	55
Figura 3.2 - Ciclo Hidrológico (Karmann, 2001).....	57
Figura 3.3 - Distribuição da precipitação de entrada (adaptado de Viessman e Lewis, 1995).....	61
Figura 3.4 - Esquema de Balanço Hídrico em uma Bacia Hidrográfica (adaptado de VILLELA e MATTOS, 1975 e VIESSMAN e LEWIS, 1995).....	62
Figura 3.5 - Influência da cobertura vegetal na distribuição da água da chuva (Prandinietal, 1976, 1982 apud Jorge e Uehara, 1998).....	66
Figura 3.6 - Possíveis interações provocadas nos recursos hídricos por atividades humanas (adaptado de Pires; Santos, 1995).....	84
Figura 3.7 - Fluxos de água verde, azul e cinza no balanço hídrico de bacias hidrográficas (adaptado de RODRIGUES E MENDIONDO, 2013).	92
Figura 3.8 - Balanço Hídrico das bacias hidrográficas brasileiras (Conejo, 2005).	93
Figura 3.9 - Pegada hídrica azul durante um ano comparando com a disponibilidade de água azul, sendo que a última é igual à vazão (em condições originais) menos as demandas de vazão ambiental.....	95
Figura 3.10 - Quadro conceitual para avaliação de perigo de inundações. As curvas exibidas são somente ilustrativas, baseadas em um caso hipotético. Na matriz, a cor amarela significa baixo perigo; a cor laranja significa moderado perigo; e a cor vermelha, alto (MOEL et al.,2009).....	104
Figura 3.11 - Modelo de integração entre o geotecnologias e a atividade intelectual na pesquisa científica.	105
Figura 3.12 - Principais etapas de avaliações ambientais envolvendo geotecnologias (adaptado de Jensen, 2009).	107
Figura 3.13 - Processamentos analógico e digital de imagens de sensoriamento remoto que utilizam os elementos de interpretação de imagens (JENSEN, 2009).	111
Figura 3.14 - Arquitetura, saídas e entradas típicas de um SIG atual (adaptado de EASTMAN, 2003).....	115
Figura 5.1 - Localização da área de estudo, a região do Médio Rio Grande (unidade de gerenciamento de recursos hídricos do CBH-GD7).....	121
Figura 5.2 - Vias de acesso e localização da região do Médio Rio Grande em relação a Belo Horizonte (capital de Minas Gerais).	122

Figura 5.3 - Gráficos de IDH médio (2000) e população (2010) dos municípios da área de abrangência da GD7 (Dados: IBGE, 2011).	123
Figura 5.4 - Distribuição espacial dos biomas e fitofisionomias que ocorrem na região de estudo. (Adaptado de Scolforo et. al., 2013).	125
Figura 5.5 - Percentual de área ocupada por tipo de vegetação na área de estudo em relação à área total ocupada por vegetação: (a) considerando apenas a vegetação natural (b), incluindo vegetação natural e silvicultura.....	126
Figura 5.6 - Classificação climática do Brasil, segundo Köppen (1936).....	127
Figura 5.7 - Mapa de classificação climática da região de estudo (Adaptado de IBGE, 2002).....	127
Figura 5.8 - Mapa de substrato rochoso da região do Médio Rio Grande (adaptado de GOMES E COLLARES, 2010 ₂).	128
Figura 5.9 - Mapa pedológico (AMARAL, 2005).	130
Figura 5.10 - Localização da área de estudo em relação a bacias e unidades de planejamento hídrico estaduais e federais.	131
Figura 5.11 - Vazão retirada por tipo de uso e por região hidrográfica em 2010 (ANA, 2012).....	132
Figura 5.12 - Uso consuntivo da água na região hidrográfica do Paraná em 2010 (Fonte: ANA, 2012).....	133
Figura 5.13 - Situação dos principais rios da área de estudo quanto à relação demanda versus disponibilidade hídrica superficial (Adaptado de ANA, 2012).	133
Figura 5.14 - Situação dos principais rios da área de estudo quanto à relação entre carga orgânica lançada e carga orgânica assimilável (Adaptado de ANA, 2009).	134
Figura 5.15 - Curvas de rendimento específico médio de longo período (a) e rendimento específico médio mensal com duração de 7 dias e recorrência de 10 anos (b) (adaptado de SOUZA, 1993).....	134
Figura 5.16 - Mapa de aquíferos do estado de Minas Gerais (SOUZA, 1995).....	135
Figura 6.1 - Chave de codificação das macrounidades ambientais.....	138
Figura 6.2 - Chave de codificação das unidades ambientais.	139
Figura 6.3 - Mapa de delimitação das macrounidades ambientais.	140
Figura 6.4 - Mapa de delimitação das unidades ambientais.....	141
Figura 6.5 - Fluxograma de etapas para caracterização do uso e ocupação.....	143
Figura 6.6 - Croqui ilustrativo da disposição espacial das imagens pancromáticas e seus respectivos códigos. (Fonte: IMAGEM, 2009)	145

Figura 6.7 - Croqui ilustrativo da disposição espacial das imagens multiespectrais e seus respectivos códigos. (Fonte: Imagem, 2009).....	146
Figura 6.8 - Imagem de ALOS na composição R4G3B2.....	147
Figura 6.9 - Imagem de ALOS na composição R3G2B1.....	148
Figura 6.10 - Croqui ilustrativo da disposição espacial das imagens Landsat5 e seus respectivos códigos identificadores.	150
Figura 6.11 - Imagem de Landsat5 na composição R4G5B3.	151
Figura 6.12 - Mapa de delimitação da área em setores para a classificação do uso e ocupação.....	152
Figura 6.13 - Localização das amostras de treinamento.	155
Figura 6.14 - Área de abrangência, em termos de percentual de área, de cada classe de uso e ocupação na unidade de gerenciamento de recursos hídricos CBH-GD7.	161
Figura 6.15 - Área de abrangência das áreas urbanas e atividades pontuais por município e a distribuição dos percentuais de cada subclasse de áreas urbanas e atividades pontuais do total dessas áreas por município (b).	167
Figura 6.16 - Percentual de área ocupada por áreas agrícolas e de vegetação natural (a) e a área de abrangência de cada subclasse relativa a tais atividades (b).	170
Figura 6.17 - Percentual de ocupação nas macrounidades ambientais por: áreas agrícolas, áreas com vegetação natural e lago.	171
Figura 6.18 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: áreas urbanas (a), áreas agrícolas (b), pecuária (c) e vegetação natural (d).	174
Figura 6.19 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: cultura permanente (a), cultura anual (b), silvicultura (c) e pastagem (d).	175
Figura 6.20 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: mineração (a), erosão, movimento de massa e solo exposto (b), disposição de resíduos sólidos (c) e indústria (d).	176
Figura 6.21 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: mata (a), campo (b), barramento (c) e estrada (d).	177
Figura 6.22 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de urbanização.	179
Figura 6.23 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto à preservação.	181
Figura 6.24 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto a atividades agropecuárias.	183

Figura 6.25 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto às atividades predominantes de uso e ocupação no terreno.	186
Figura 6.26 - Fluxograma síntese das principais etapas metodológicas da caracterização climática.	187
Figura 6.27 - Exemplo de consulta realizada ao banco de dados do levantamento e caracterização de estações de monitoramento com dados.	190
Figura 6.28 - Comparação, mostrando testes de interpolação, da variável precipitação total anual média entre 2000 e 2009. As ferramentas de interpolação utilizadas nos testes de regionalização dessa variável foram: <i>IDW</i> (a); <i>Kriging</i> (b), <i>Natural Neighbor</i> (c), <i>Spline</i> (d) e <i>Topo to Raster</i> (e).	197
Figura 6.29 - Balanço de radiação da superfície(adaptado de Allen, 1998).	200
Figura 6.30 - Fluxograma representando os procedimentos metodológicos adotados para o balanço de energia à superfície.	201
Figura 6.31 - Mapa de altura pluviométrica total anual média do período entre 1980 e 2009.	206
Figura 6.32 - Gráficos de altura pluviométrica máxima, média e mínima total anual por macrounidade ambiental (a) e por município (b).	207
Figura 6.33 - Gráfico de altura pluviométrica total mensal média, mínima e máxima da bacia, análise do período entre 1980 e 2009.	209
Figura 6.34 - Mapas de altura pluviométrica total de períodos secos e chuvosos.	210
Figura 6.35 - Mapas de altura pluviométrica total dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril.	211
Figura 6.36 - Mapas de altura pluviométrica total dos meses de maio, junho, julho e agosto.	212
Figura 6.37 - Mapas de altura pluviométrica total dos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.	213
Figura 6.38 - Gráfico de altura pluviométrica total mensal com análise em diferentes períodos.	214
Figura 6.39 - Gráfico de altura pluviométrica total anual, média, mínima e máxima das estações climáticas analisadas do período entre 1980 e 2009.	215
Figura 6.40 - Distribuição dos totais pluviométricos mensais e anuais, média das estações climatológicas analisadas) (a) e contribuição em termos percentuais de cada mês para o índice pluviométrico total anual do período entre 1980 e 2009 (b).	217
Figura 6.41 - Curva de permanência média, máxima e mínima de índices pluviométricos totais anuais. Análise do período entre 1980 e 2009.	220

Figura 6.42 - Mapas de altura pluviométrica total anual mínima com probabilidades de ocorrência de 90%, 80%, 30% e 10%.....	221
Figura 6.43 - Gráficos de altura pluviométrica máxima de 24 horas em função de diferentes períodos de recorrência (distribuição Gumbel de probabilidades).....	223
Figura 6.44 - Mapas de chuva intensa com período de duração de 24 horas, recorrência de 2, 10, 50 e 100 anos.....	224
Figura 6.45 - Gráficos de altura pluviométrica máxima provável com duração de 24h, com períodos de recorrência (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, média por município e por macrounidade ambiental.....	227
Figura 6.46 - Mapa de temperatura média anual (média do período entre 2000 e 2009).	229
Figura 6.47 - Gráficos de temperatura média anual, máxima, média e mínima por macrounidade ambiental (a) e por município (b).	230
Figura 6.48 - Gráfico de temperatura média mensal e anual, com valores médio, mínimo e máximo de incidência na área de estudo.....	232
Figura 6.49 - Mapas de temperatura média dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, média do período entre 2000 e 2009.	233
Figura 6.50 - Mapas de temperatura média dos meses de maio, junho, julho e agosto, média do período entre 2000 e 2009.....	234
Figura 6.51 - Mapas de temperatura média dos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, média do período entre 2000 e 2009.	235
Figura 6.52 - Mapa de radiação global anual da região do Médio Rio Grande.....	237
Figura 6.53 - Modelos mensais de radiação global da região do Médio Rio Grande. .	238
Figura 6.54 - Gráfico de radiação global mínima, máxima e média por mês da região do Médio Rio Grande.....	239
Figura 6.55 - Mapa de albedo à superfície.	241
Figura 6.56 – Gráficos de valores médios de albedo à superfície por macrounidade ambiental (a) e por município (b).	242
Figura 6.57 - Mapa de temperatura de superfície.	245
Figura 6.58 - Mapa de fluxo de calor no solo.	246
Figura 6.59 - Gráficos de valores médios de temperatura à superfície e fluxo de calor no solo por macrounidade ambiental (a) e por município (b) desconsiderando a área do lago.	247
Figura 6.60 - Mapa de evapotranspiração horária.....	248

Figura 6.61 - Mapa de evapotranspiração potencial da região do Médio Rio Grande.	250
Figura 6.62 - Evapotranspiração média anual, com valores médio, mínimo e máximo de incidência na área de estudo.....	251
Figura 6.63 - Evapotranspiração potencial média por município (a) e por macrounidade (b).....	252
Figura 6.64 - Taxas de valores de P, ETP e ETR ao longo do ano médios da região de estudo (a) e em pontos localizados em faixas de índice de umidade máximos (b) e mínimos (c).	254
Figura 6.65 - Processos de retirada, reposição, excedente e deficiência hídrica no solo ao longo do ano médios da região de estudo (a) e em pontos localizados em faixas de índice de umidade máximos (b) e mínimos (c).	255
Figura 6.66 - Mapa de localização das estações fluviométricas analisadas e suas respectivas áreas de contribuição.	259
Figura 6.67 - Rendimento específico médio mensal ($\text{m}^3/\text{s.km}^2$) das áreas de contribuição das estações fluviométricas analisadas no período entre 1967 e 2005.	263
Figura 6.68 - Gráficos comparativos entre rendimentos específicos médios mensais das estações fluviométricas e altura pluviométrica total mensal média da região do Médio Rio Grande.	265
Figura 6.69 - Fluxograma de aspectos metodológicos adotados para a caracterização geomorfológica da área.....	267
Figura 6.70 - Procedimento para calculo da matriz HAND (adaptado de Rennó, 2008).	271
Figura 6.71 - Forma de cálculo de densidade por meio da ferramenta “Kernel Density”,(a) Superfície suavemente curva colocada sobre cada linha; (b) Soma dos valores de todas as superfícies de kernel.	272
Figura 6.72 - Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente da região do Médio Rio Grande.....	277
Figura 6.73 - Carta de declividades da região do Médio Rio Grande.....	279
Figura 6.74 - Procedimentos metodológicos e resultados obtidos para elaboração da carta de ICR.....	280
Figura 6.75 - Carta de Índice de concentração de rugosidade (ICR) da região do Médio Rio Grande.	282
Figura 6.76 - Carta de Índice de concentração de canais de drenagem (ICCD) da região do Médio Rio Grande.	284
Figura 6.77 - Gráfico de quantificação da densidade hidrográfica média e suas taxas de variação por unidade geológica.....	285

Figura 6.78 - Carta de Índice de concentração de gradientes de canais da região do Médio Rio Grande.....	287
Figura 6.79 - Carta de distância vertical da drenagem mais próxima da região do Médio Rio Grande.	289
Figura 6.80 - Percentual de área ocupado por classe de distância vertical da drenagem em cada macrounidade ambiental.....	291
Figura 6.81 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica às cheias relâmpago.....	296
Figura 6.82 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica às inundações da planície.	297
Figura 6.83 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica de regularização de vazões.	298
Figura 6.84 - Fluxograma de aspectos metodológicos relacionados à avaliação do potencial de escoamento superficial e infiltração	299
Figura 6.85 - Matriz AHP para a atribuição de pesos entre os planos de informação para a avaliação do potencial do meio físico ao escoamento superficial.	304
Figura 6.86 - Matriz AHP para a atribuição de pesos entre os planos de informação para a avaliação do potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial.	304
Tabela 6.10 - Níveis de potencial de escoamento superficial segundo a declividade do terreno.....	305
Figura 6.87 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de declividade do terreno.	306
Figura 6.88 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de densidade hidrográfica.	307
Figura 6.89 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de potencial ao escoamento superficial do terreno exercido pela geologia.....	309
Figura 6.90 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de potencial ao escoamento superficial do terreno exercido pela pedologia.	310
Figura 6.91 - Análise AHP das classes referentes ao atributo uso e ocupação, quanto ao potencial de escoamento superficial e infiltração.	312
Figura 6.92 - Análise AHP das classes referentes ao atributo densidade de barramentos, quanto ao potencial de escoamento superficial e infiltração.....	313
Figura 6.93 - Carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.	314
Figura 6.94 - Percentual de área ocupada por classe de potencial do meio físico ao escoamento superficial nas macrounidades ambientais e nos municípios.	316

Figura 6.95 - Carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.	318
Figura 6.96 - Comparação entre as cartas de potencial de escoamento superficial, geradas conforme diferentes metodologias, entre as diferentes formas de divisão das matrizes em classes segundo a distribuição da população de valores.	320
Figura 6.97 - Gráficos que representam o percentual de classes das cartas de potencial do meio físico ao escoamento superficial que estão contidas nas diferentes classes da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial, segundo as divisões da população de valores em quantis (a) e em intervalos geométricos (b).	321
Figura 6.98 - Carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial.	324
Figura 6.99 - Percentual de área ocupada por classe de potencial do meio físico ao escoamento superficial nas macrounidades ambientais e nos municípios.	325
Figura 6.100 - Percentual de área ocupada por classe de escoamento superficial na área de estudo, ora considerando o meio físico, ora considerando os meios físico e antrópico.	326
Figura 6.101 - Percentual de área ocupada por níveis de potencial do meio físico ao escoamento superficial em grupos de classes de uso e ocupação do terreno.	327
Figura 6.102 - Cartas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de escoamento superficial e quanto às alterações no potencial de escoamento devido à cobertura do terreno.	329
Figura 6.103 - Mapa de evapotranspiração potencial.	342
Figura 6.104 - Gráficos de evapotranspiração potencial anual (mm) por município (a) e por macrounidade ambiental (b), considerando-se e desconsiderando-se a área do lago.	344
Figura 6.105 - Gráfico de valores médios de evapotranspiração potencial anual por unidade ambiental.	345
Figura 6.106 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto a demanda hídrica verde.	346
Figura 6.107 - Número de pontos de uso de recursos hídricos e empreendimentos cadastrados por tipo de atividade.	347
Figura 6.108 - Percentual de pontos cadastrados por tipo de uso.	348
Figura 6.109 - Percentual de retirada (a) e consumo (b) de água por tipo de uso consuntivo.	348
Figura 6.110 - Uso consuntivo da água nas macrounidades ambientais (a) volume anual consumido por tipo de uso nas macrounidades (b) detalhe na faixa de valores entre 0 e 700000m ³ /ano.	351

Figura 6.111 - Uso consuntivo de água nas macrounidades ambientais percentual de consumo por tipo de uso.....	352
Figura 6.112 - Demanda hídrica azul nas unidades ambientais.	353
Figura 6.113 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de demanda hídrica azul.	354
Figura 6.114 - Carta de índice de potencial de poluição não pontual.	356
Figura 6.115 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de demanda hídrica cinza difusa.	357
Figura 6.116 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de demanda hídrica cinza pontual.....	358
Figura 6.117 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de demanda hídrica cinza.....	359
Figura 6.118 - Chave de codificação das unidades ambientais quanto à potencialidade à ocorrência de enchentes relâmpago.....	362
Figura 6.119 - Chave de codificação da classificação das planícies quanto à potencialidade à ocorrência de inundação.	365
Figura 6.120 - Chave de codificação da classificação das unidades ambientais quanto a potencialidades relacionadas à disponibilidade hídrica.....	369

Lista de Tabelas

Tabela 6.1 - Datas de aquisição das imagens pancromáticas e seus respectivos códigos.	145
Tabela 6.2 - Data de aquisição das imagens multiespectrais e seus respectivos códigos.	146
Tabela 6.3 - Principais características das bandas do sensor TM a bordo do satélite Landsat5.....	149
Tabela 6.4 - Datas e horários de aquisição das imagens Landsat5 e seus respectivos códigos.....	150
Tabela 6.5 - Modelo de planilha de campo.	154
Tabela 6.6 - Alturas pluviométricas máxima, mínima e média da bacia com diferentes períodos de análise.....	209
Tabela 6.7 - Períodos de ocorrência de eventos de El Niño e La Niña e suas intensidades. (Fonte: CPETC/INPE, 2013)	219
Tabela 6.8 - Resultados de temperatura média da bacia em diferentes períodos de análise, contendo valor máximo, mínimo e médio obtido por intervalo de análise. .	231
Tabela 6.9 – Resultados de evapotranspiração média da bacia em diferentes períodos de análise, valores máximo, mínimo e médio obtido por intervalo de análise.	251
Tabela 6.11 - Potencial de escoamento superficial segundo a concentração de canais de drenagem.....	307
Tabela 6.12 - Potencial de escoamento superficial dos grupos de rocha.	307
Tabela 6.13 - Potencial de escoamento superficial dos grupos de solos.....	310
Tabela 6.14 - Classes de potencial de escoamento superficial conforme o uso e ocupação.....	312
Tabela 6.15 - Classes de potencial de escoamento superficial a densidade de barramentos de cada unidade ambiental.	313
Tabela 6.16 – Coeficiente de consumo de atividades industriais.	336

Lista de Quadros

Quadro 3.1 - Influência da latitude, a altitude e do albedo à superfície sobre o clima.	70
Quadro 3.2 - Valores do coeficiente de escoamento superficial C, em função das características das bacias (Villela e Mattos, 1975).	78
Quadro 3.3 - Pontuação de atributos do meio físico utilizados na classificação do potencial ao escoamento superficial e infiltração da região de Piracicaba (SP) (Pejon e Zuquete, 1993).	79
Quadro 3.4 - Valores usuais de Curvas Índice (n) (Souza, 1993).	81
Quadro 3.5 - Valores usuais do coeficiente de escoamento em função do uso e ocupação do solo (Souza, 1993).	85
Quadro 3.6 - Influência de parâmetros morfométricos no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.	89
Quadro 3.7 - Variáveis direta e inversamente proporcionais ao tempo de concentração e a capacidade de regularização de vazões de bacias hidrográficas.	90
Quadro 3.8 - Coeficientes de retorno médios da vazão captada em função dos principais tipos de uso consuntivo da água.	94
Quadro 3.9 - Estudos de pegada hídrica (Hoekstra, 2011).	94
Quadro 5.1 - Características das hidrelétricas presentes na área de estudo (Fonte: FURNAS, 2013).	124
Quadro 5.2 - Percentual de área ocupada por classe de substrato rochoso e unidade geológica na região do Médio Rio Grande.	129
Quadro 6.1 - Quantidade de bacias hidrográficas na área de estudo por ordem de ramificação (4ª a 8ª ordem).	142
Quadro 6.2 - Classes e subclasses de uso e ocupação definidas para o estudo	159
Quadro 6.3 - Abrangência das classes e subclasses de uso e ocupação na unidade de gerenciamento de recursos hídricos CBH-GD7.	162
Quadro 6.4 - Intervalos de classe definidos através da análise de agrupamentos, para classificação das unidades ambientais quanto aos seus níveis de ocupação dos tipos de uso analisados.	173
Quadro 6.5 - Intervalos de classes definidos para classificação das unidades ambientais com relação às áreas urbanas.	178
Quadro 6.6 - Intervalos de classe definidos para classificação das unidades ambientais em relação à preservação ambiental	180

Quadro 6.7 - Intervalos de classes definidos para classificação das unidades ambientais com relação aos seus níveis de ocupação por atividades agropecuárias.	182
Quadro 6.8 - Intervalos de classe definidos para classificação das unidades ambientais com relação às atividades predominantes de uso e ocupação do terreno.	185
Quadro 6.9 - Relação entre as alturas pluviométricas das chuvas de diferentes durações P_{t1}/P_{t2} (Fonte: Genovez e Zuffo, 2003).	196
Quadro 6.10 - Características gerais das estações fluviométricas analisadas.	258
Quadro 6.11 - Características físicas das áreas de contribuição das estações fluviométricas analisadas	258
Quadro 6.12 - Vazão máxima em diferentes períodos de retorno, segundo distribuição de probabilidade Gumbel.	260
Quadro 6.13 - Vazão mínima com período de duração de 7 dias e recorrência de 10 anos e seus respectivos rendimentos específicos	261
Quadro 6.14 - Rendimento específico médio mensal ($m^3/s.km^2$) em cada estação fluviométrica no período entre os anos de 1967 e 2005.	262
Quadro 6.15 - Rendimentos específicos médios mensais das áreas de contribuição das estações fluviométricas analisadas.	264
Quadro 6.16 - Vazão média anual de longa duração e seus respectivos rendimentos específicos das estações fluviométricas analisadas.	264
Quadro 6.17 - Ferramentas e dados de entrada para elaboração dos modelos de fluxo acumulado, declividade e direção do fluxo.	270
Quadro 6.18 - Arquivos de entrada e campo população programados para geração das matrizes com os diferentes índices geomorfométricos.	271
Quadro 6.19 - Procedimentos utilizados para as mensurações dos parâmetros morfométricos básicos.	273
Quadro 6.20 - Procedimentos adotados na estimativa de parâmetros morfométricos derivados dos parâmetros básicos.	274
Quadro 6.21 - Altimetria das macrounidades ambientais que compõem a área de estudo.	276
Quadro 6.22 - Média e desvio padrão da declividade por macrounidade ambiental.	278
Quadro 6.23 - Área de abrangência de regiões com distância vertical da drenagem inferior a 5 e a 15 metros.	290
Quadro 6.24 - Índices morfométricos considerados influentes sobre os processos hidrológicos avaliados e seus respectivos pesos a cada índice.	295
Quadro 6.25 - Captação e consumo de água por tipo de animal.	334

Quadro 6.26 - Consumo de água em função de diferentes culturas agrícolas irrigadas.	338
Quadro 6.27 - Pesos dos indicadores e atributos considerados na estimativa do índice de potencial de poluição não pontual (PNPI).....	340
Quadro 6.28 - Indicadores e pesos relativos de cada indicador e de seus atributos na avaliação do potencial de ocorrência de enchentes relâmpago.....	361
Quadro 6.29 - Indicadores e pesos relativos de cada indicador e de seus atributos na avaliação do potencial de ocorrência de enchentes relâmpago.....	364
Quadro 6.30 - Indicadores e pesos relativos de cada indicador e de seus atributos na avaliação da disponibilidade hídrica potencial das unidades ambientais.	368

Lista de Abreviaturas e Siglas

AHP	Processo Analítico Hierárquico
ALOS	Advanced Land Observation Satellite
ANA	Agência Nacional de Águas
ANN's	Artificial Neural Networks
AVINIR-2	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2
CAD	Capacidade de Água Disponível no Solo
CERH	Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos
CETCAF	Centro de Desenvolvimento Tecnológico do Café
CGH-GD7	Comitê de bacia hidrográfica do Médio Rio Grande
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COGEOENVIROMENT	Comission on Geological Science of Environment Planning
COMIG	Companhia Mineradora de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COOPARAÍSO	Cooperativa de Cafeicultores de São Sebastião do Paraíso
COOXUPÉ	Cooperativa de Cafeicultores de Guaxupé
CPRM	Serviço Geológico - Brasil
CPTEC	Centro de Previsões do Tempo e Estudos Climatológicos
Cwb	Clima temperado húmido com inverno seco e verão temperado
Dh	Densidade hidrográfica
DI	Distance Indicator
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
FBB	Fundação Banco do Brasil
FCE	Furnas Centrais Elétrica
FO	Estação climática fora de operação
FUNARBE	Fundação de Apoio à Universidade de Viçosa
GD7	Região do Médio Rio Grande
GLCM	Grey Level Co-occurrence Matrix
GPRH	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos
GPS	Global Positioning System
HAND	Height Above the Nearest Drainage

HEC-HMS 2.1	Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCD	Índice de concentração de canais de drenagem
ICGC	Índice de concentração de gradientes de canais
ICR	Índice de concentração de rugosidade
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDW	Inverso do Quadrado da Distância
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INE	Instituto Nacional de Estatística (Portugal)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IUGS	International Union of Geological Sciences
JPL	Jet Propulsion Laboratory - Nasa
LCI	Land Cover Indicator
LMM	Linear Mixture Model
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente
MDSA	Modelo de Demanda Setorial por Recursos Hídricos
MLC	Maximum Likelihood Classifier
MLP	Multilayer Perceptron
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MQP	Mínimo dos Quadrados Ponderados
MV	Máxima Verossimilhança
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASVSTAR GPS	Navigation System with Time And Ranging Global Positioning System
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NoWUM	Nordeste Water Use Model
O	Estação climática em operação
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Precipitação
PCA	Principal Component Analysis
PNPI	Potential Non-point Pollution Index
PNSC	Parque Nacional da Serra da Canastra
PRISM	Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping

ROI	Run-off Indicator
SAD69	South American 1969
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SINGERH	Sistema Integrado para Gestão de Recursos Hídricos
SisCAH	Sistema Computacional para Análises Hidrológicas
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SM	Índice de Suscetibilidade Morfométrica
SNRH	Sistema Nacional de Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVM	Support Vector Machines
U.S. Conservation Service	Natural Resources Conservation Services
U.S. DoD	Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UNESP	Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho
UPH	Unidade de Planejamento Hídrico

Sumário

Volume I

Introdução	45
1 Objetivos.....	49
2 Justificativa	51
3 Revisão bibliográfica.....	53
3.1 Estudo geoambiental	53
3.2 Ciclo hidrológico.....	56
3.3 Bacia hidrográfica	59
3.3.1 <i>Bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento hidrológico e ambiental</i>	<i>59</i>
3.4 Balanço hídrico.....	61
3.5 Estimativa de aspectos climáticas	69
3.5.1 <i>Fatores que influenciam no clima.....</i>	<i>69</i>
3.5.2 <i>Principais parâmetros a serem estimados para fins de gerenciamento de recursos hídricos.....</i>	<i>70</i>
3.5.3 <i>Principais técnicas de análise de séries de dados climatológicos e zoneamento climático</i>	<i>73</i>
3.6 Estimativa de potencialidades de escoamento superficial e infiltração	78
3.6.1 <i>Fatores intervenientes no potencial de escoamento superficial e infiltração</i>	<i>80</i>
3.6.1.1 Precipitação.....	82
3.6.1.2 Tipo e condição dos materiais terrestres.....	82
3.6.1.3 Uso e ocupação do terreno.....	83
3.6.1.4 Topografia	86

3.7	Morfometria e comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.....	87
3.8	Estimativa de Potencialidades de demanda hídrica	90
3.9	Extremos hidrológicos: excedentes e deficiências hídricas.....	95
3.9.1	<i>Disponibilidade hídrica</i>	96
3.9.1	<i>Estudos relacionados à disponibilidade hídrica</i>	98
3.9.2	<i>Inundação</i>	101
3.9.3	<i>Estudos relacionados à Inundação</i>	103
3.10	Geotecnologias aplicadas a estudos geoambientais	105
3.10.1	<i>GPS</i>	108
3.10.2	<i>Sensoriamento Remoto</i>	109
3.10.3	<i>Geoprocessamento</i>	113
3.10.4	<i>Sistemas de Informação Geográfica – SIG’s</i>	113
4	Material e métodos	117
4.1	Material.....	117
4.2	Métodos.....	118
5	Caracterização da área de estudo.....	121
5.1	Localização	121
5.2	Socioeconomia.....	123
5.3	Vegetação	125
5.4	Clima	126
5.5	Geologia e Geomorfologia	128
5.6	Solos.....	130
5.7	Recursos hídricos superficiais e sub-superficiais.....	131
6	Obtenção e tratamento de dados e análise das informações	137
6.1	Compartimentação da área de estudo em macrounidades e unidades ambientais.....	137
6.2	Análises básicas.....	142

6.2.1	<i>Uso e ocupação</i>	142
6.2.1.1	Obtenção e tratamento básico das imagens de satélite	143
6.2.1.2	Compartimentação da área em setores	151
6.2.1.3	Levantamento de campo	153
6.2.1.4	Delimitação/Detecção de alvos.....	156
6.2.1.5	Refinamento dos resultados	156
6.2.1.6	Vetorização, quantificação e análise de resultados.....	157
6.2.1.7	Critérios e peculiaridades da detecção e classificação de alvos	158
6.2.1.8	Avaliação dos padrões de ocupação antrópica e preservação ambiental da região do Médio Rio Grande	160
6.2.1.8.1	Padrões de uso e ocupação por município	169
6.2.1.8.2	Padrões de uso e ocupação por macrounidade ambiental	171
6.2.1.8.3	Padrões de uso e ocupação por unidade ambiental.....	172
6.2.2	<i>Clima</i>	187
6.2.2.1	Inventário de estações climatológicas, levantamento de dados e estruturação do banco de dados.....	188
6.2.2.2	Análise dos dados de postos de monitoramento climatológico.....	191
6.2.2.2.1	Períodos de análise, critérios para descarte de períodos e de estações de monitoramento climático	191
6.2.2.2.2	Análise de consistência e preenchimento de séries de pluviosidade e temperatura mensais e anuais	192
6.2.2.2.3	Variáveis de pluviosidade e temperatura analisadas	194
6.2.2.2.4	Análise de dados de chuvas intensas	195
6.2.2.3	Regionalização de dados de pluviosidade e temperatura	196
6.2.2.4	Modelagem da radiação solar a partir do MDEHC	198
6.2.2.5	Balanco energético de superfície e estimativa da evapotranspiração (instantâneos).....	199

6.2.2.6	Evapotranspiração potencial (com base nos modelos de temperatura média mensal e anual) e análise integrada de dados climatológicos (BHC)	203
6.2.2.7	Análise de padrões climatológicos	204
6.2.2.7.1	Pluviosidade	204
6.2.2.7.2	Temperatura.....	228
6.2.2.7.3	Radiação global e duração da radiação com base no MDEHC.....	236
6.2.2.7.4	Resultados obtidos a partir do balanço energético à superfície - modelo SEBAL: Albedo à superfície, Temperatura à superfície, Fluxo de calor no solo e Evapotranspiração horária.....	240
6.2.2.7.5	Evapotranspiração potencial com base nos modelos de temperatura média mensal e anual.....	249
6.2.2.8	Análise integrada de dados climatológicos: balanço hidro-climatológico médio anual	253
6.2.3	<i>Fluviometria</i>	256
6.2.3.1	Tratamento dos dados de monitoramento fluviométrico.....	256
6.2.3.2	Análise de dados de monitoramento fluviométrico	256
6.2.3.2.1	Características gerais dos postos fluviométricos e de suas bacias de contribuição.....	256
6.2.3.2.2	Vazão máxima com períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos.	260
6.2.3.2.3	Vazão mínima com período de duração de 7 dias e recorrência de 10 anos.	261
6.2.3.2.4	Vazões e rendimentos específicos médios mensais (de longa duração)	261
6.2.4	<i>Avaliação Geomorfométrica</i>	267
6.2.4.1	Estruturação da base topográfica e preparação do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC).....	268
6.2.4.1.1	Elaboração de modelos geomorfométricos derivados da base topográfica e/ou do MDEHC	270

6.2.4.2	Levantamento morfométrico.....	272
6.2.4.3	Avaliação dos resultados geomorfométricos da região do Médio Rio Grande	275
6.2.4.3.1	Hipsometria.....	275
6.2.4.3.2	Declividade	278
6.2.4.3.3	Índice de concentração de rugosidade	280
6.2.4.3.4	Índice de concentração de canais de drenagem.....	283
6.2.4.3.5	Índice de concentração de gradientes de canais	286
6.2.4.3.6	Distância vertical da drenagem mais próxima	288
6.3	Análise integrada dos dados, mapas e cartas.....	292
6.3.1	<i>Potencial morfométrico às cheias e à regularização de vazão</i>	<i>292</i>
6.3.2	<i>Potencial de escoamento superficial</i>	<i>299</i>
6.3.2.1	Elaboração da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial	300
6.3.2.2	Preparação da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial	301
6.3.2.3	Elaboração da carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial.....	302
6.3.2.4	Relação entre atributos dos meios físico, biótico e socioeconômico e o potencial de escoamento superficial.....	303
6.3.2.4.1	Declividade	305
6.3.2.4.2	ICCD – Índice de Concentração de Canais de Drenagem.....	306
6.3.2.4.3	Geologia	307
6.3.2.4.4	Pedologia.....	309
6.3.2.4.5	Uso e Ocupação.....	311
6.3.2.4.6	Densidade de barramentos.....	312
6.3.2.5	Resultados de potencial do meio físico ao escoamento superficial	313

6.3.2.6	Resultados de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial	317
6.3.2.7	Comparação de resultados obtidos nas cartas de potencial geomorfométrico e de potencial do meio físico ao escoamento superficial....	319
6.3.2.1	Resultados de Potencial dos Meios Físico e Antrópico ao escoamento superficial	323
6.3.2.2	Análise de mudanças nos padrões de escoamento devido à cobertura do terreno	326
6.3.3	<i>Demandas hídricas</i>	331
6.3.3.1	Verde	331
6.3.3.2	Azul	332
6.3.3.2.1	Dessedentação de animais.....	334
6.3.3.2.2	Consumo humano	335
6.3.3.2.3	Abastecimento público	335
6.3.3.2.4	Consumo industrial	335
6.3.3.2.5	Lavagem de veículos	336
6.3.3.2.6	Pulverização de café.....	337
6.3.3.2.7	Irrigação.....	337
6.3.3.3	Cinza	338
6.3.3.1	Padrões de demanda hídrica verde	341
6.3.3.1.1	Análise dos padrões de demanda hídrica azul.....	347
6.3.3.1.2	Análise dos padrões de demanda hídrica cinza	355
6.4	Análises finais – Potencialidades: Excedentes e deficiências hídricas	360
6.4.1	<i>Potencialidades de excedentes hídricos</i>	360
6.4.1.1	Potencialidade de cheias relâmpago	360
6.4.1.1	Potencialidade de inundação de planícies.....	363
6.4.2	<i>Potencialidades de disponibilidade hídrica</i>	365

7	Considerações finais	371
7.1	Uso de geotecnologias.....	371
7.2	Análises realizadas e resultados obtidos	372
7.2.1	<i>Compartimentação em macrounidades e unidades ambientais.....</i>	<i>372</i>
7.2.2	<i>Padrões de ocupação territorial</i>	<i>372</i>
7.2.3	<i>Potencialidades hidro-climáticas.....</i>	<i>373</i>
7.2.4	<i>Geomorfometria</i>	<i>373</i>
7.2.5	<i>Potencial de escoamento superficial</i>	<i>373</i>
7.2.6	<i>Demandas hídricas potenciais.....</i>	<i>374</i>
7.2.7	<i>Potencialidades de excedentes e deficiências hídricas.....</i>	<i>375</i>
7.3	Propostas para trabalhos futuros	376
7.3.1	<i>Visando à obtenção de técnicas mais automatizadas de mapeamento geomorfológico</i>	<i>376</i>
7.3.2	<i>Visando ao gerenciamento dos recursos hídricos da região do Médio Rio Grande</i>	<i>376</i>
	Referências	379

Volume II

Apêndices	397
Apêndice A – Mapa de documentação	399
Apêndice B - Mapa de compartimentos ambientais.....	401
Apêndice C – Mapa de uso e ocupação (a) setor norte (b) setor sul	403
Apêndice D – Mapa de localização das estações climáticas	405

Apêndice E – Gráficos, por intervalo de análise (1980 a 1989, 1990 a 1999, 2000 a 2009), constando os valores máximos, mínimos e médios registrados em cada estação climatológica, relativos à altura pluviométrica total: anual, de trimestres secos, de trimestres chuvosos, de meses mais secos e de meses mais chuvosos.	407
Apêndice F – Mapas de altura pluviométrica total: anual, de trimestres secos, de trimestres chuvosos, de meses mais secos e de meses mais chuvosos.	409
Apêndice G – Carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial	411
Apêndice H – Carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial	413
Apêndice I – Carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial	415
Apêndice J – Carta de potencial de cheias relâmpago	417
Apêndice K – Carta de potencial de inundação de planícies.....	419
Apêndice L – Carta de potencial de disponibilidade hídrica	421

Introdução

Dentre as questões ambientais atuais, nota-se que a escassez da água é uma realidade; os conflitos envolvendo seus múltiplos tipos de uso são a cada dia mais frequentes. A gestão de recursos hídricos consiste em um dos maiores desafios da atualidade (ALLEN, 2002). Assim, hoje, é reconhecida a relevância de políticas ambientais envolvendo o planejamento e a gestão de recursos hídricos.

A Lei Federal 9433/1997 e a Lei Estadual 13199/1999 determinam o funcionamento da Política de Recursos Hídricos no Brasil, que considera a bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento ambiental. Com a efetivação dessa política, foram instituídos como instrumentos do Sistema Nacional de Recursos Hídricos: o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH) e os Comitês de Bacias, respectivamente a nível nacional, estadual e de bacias.

Na região do Médio Rio Grande, em dezembro de 2003, foi instituído o Comitê de Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande (CBH-GD7), o qual deve deliberar sobre recursos hídricos, bem como elaborar um Plano Diretor de Recursos Hídricos. Esse comitê necessita conhecer em profundidade a bacia, fazer diagnósticos e prognósticos (com informações técnicas bem estruturadas e convergentes à bacia), decidindo como e quanto será cobrado pelo uso dos recursos hídricos e como esses recursos arrecadados serão aplicados na bacia.

O CBH-GD7 está realizando o Zoneamento Ambiental do Médio Rio Grande (pelo convênio SEMAD 13710104044809), projeto denominado "Grande Minas: União Pelas Águas". O referido trabalho tem como objetivo fornecer instrumentos técnicos e científicos para viabilizar a elaboração e a aprovação do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia. Assim, o comitê poderá dar início ao sistema de cobrança de usuários e, lançando mão dos recursos arrecadados, tomar medidas visando ao desenvolvimento sustentável e ao uso racional dos recursos hídricos da região.

A compreensão dos sistemas naturais e das leis físicas que regem cada componente do ciclo hidrológico é de suma importância para o correto gerenciamento dos recursos hídricos.

A avaliação geoambiental objetiva auxiliar o planejamento, o ordenamento territorial e a aplicação dos recursos disponíveis, uma vez que obtém e analisa padrões relacionados a diversos parâmetros de cunho ambiental das unidades territoriais e seus principais “*hot spots*”.

Vale destacar a relevância da análise de padrões hidrológicos e de ocupação territorial no contexto do zoneamento ambiental voltado ao planejamento e à gestão de recursos hídricos. As referidas análises são consideradas básicas para o planejamento ambiental e necessariamente deverão constar no diagnóstico ambiental do projeto “Grande Minas: União Pelas Águas”.

Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise regional de padrões de ocupação e hidrológicos das unidades territoriais que compõem a região do Médio Rio Grande. A avaliação dos padrões hidrológicos busca analisar as potencialidades ambientais relativas à disponibilidade hídrica e inundações.

A avaliação da disponibilidade hídrica deve contribuir para o controle do uso dos recursos hídricos das bacias da região. A análise de suscetibilidade a inundação possibilita a prevenção de possíveis perdas econômicas, relacionadas a esse tipo de desastre natural, como se tem verificado no Brasil.

Para alcançar os objetivos da análise geoambiental direcionada ao planejamento e à gestão de recursos hídricos, a metodologia adotada nesta pesquisa envolveu:

- o inventário e o levantamento de dados pré-existentes, como mapas, séries históricas de monitoramento hidro-climatológico, dados cadastrais de atividades pontuais e usuários de recursos hídricos;
- a estruturação da base de dados georreferenciados, a análise de dados e preparação dos modelos básicos, envolvendo análise de padrões hidro-climáticos, de ocupação territorial e geomorfométricos;

- a análise integrada de dados, mapas e informações abrangendo a preparação de modelos interpretativos de potencialidades hidrológicas relacionadas à morfometria das bacias, potencialidades relativas aos aspectos dos meios físico e antrópico de escoamento superficial e infiltração e potencialidades de demanda hídrica; e
- a avaliação de potencialidades de excedentes e deficiências hídricas pela integração dos modelos ambientais básicos e intermediários.

1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral realizar a avaliação geoambiental das unidades ambientais da região do Médio Rio Grande, com enfoque sobre aspectos relacionados à cobertura do solo e hidrologia. Pretende-se, dessa forma, contribuir com o projeto “Grande Minas: União Pelas Águas”.

Os objetivos específicos são:

- gerar o mapa de uso e ocupação do solo;
- classificar as unidades ambientais quanto às atividades predominantes e quanto às atividades modificadoras do meio físico;
- avaliar dados do cadastro de usuários envolvendo o levantamento das captações superficiais e sub-superficiais;
- gerar carta de potencial de escoamento superficial e infiltração;
- realizar uma análise de aspectos relacionados à disponibilidade hídrica;
- realizar a avaliação da susceptibilidade às cheias da área de estudo.

2 Justificativa

A unidade de gerenciamento de recursos hídricos GD7, região do Médio Rio Grande, possui uma área expressiva e contém diversas bacias, que devem ser caracterizadas quanto ao uso e ocupação, permitindo a sua classificação quanto aos padrões de ocupação territorial relativos aos diversos tipos de uso socioeconômico e de atividades modificadoras do meio físico predominantes, bem como padrões hidrológicos relacionados aos excedentes (cheias) e as deficiências (secas) hídricas.

A presente pesquisa produziu informações relevantes com potencial de subsidiar o diagnóstico e o prognóstico do projeto "Grande Minas: União Pelas Águas". Ela permite a ligação entre informações dos meios biofísico e socioeconômico e pode subsidiar o planejamento e a gestão exercida pelo comitê de bacia (CBH-GD7), pelas administrações municipais e demais entidades gestoras públicas regionais, através de documentos técnico-científicos, visando à redução de potenciais consequências relacionadas à ocupação territorial e anomalias hidro climatológicas.

A avaliação ambiental de grandes bacias hidrográficas, em nível de detalhe, que viabiliza ações efetivas de planejamento, ainda carece de metodologia adequada. Esta pesquisa se reveste de importância relativa ao desenvolvimento de uma sistemática metodológica para avaliação geoambiental direcionada ao gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Estudo geoambiental

A terminologia, ambiente geológico, ou geoambiente, faz referência à porção superior da litosfera que sofre influência de atividades humanas. O geoambiente é composto por rochas, solos, fluidos, gases e organismos e é ligado e afetado pela atmosfera, clima, terreno e cobertura vegetal (ASWATHANARAYANA, 1995).

Estudos geoambientais são relevantes na realização do planejamento em conformidade com a capacidade das unidades e possibilitam o máximo uso de recursos naturais com um mínimo dano ambiental (CENDRERO, 1975).

Segundo Sobreira (1995), os objetivos de estudos de natureza geoambiental são:

- a) demarcar cartograficamente regiões com maior qualidade ambiental que devam ser preservadas;
- b) propor medidas que visem a melhorar, recuperar ou reabilitar os elementos e/ou processos do meio natural que se encontrem degradados por atividades incompatíveis com sua vocação de uso, entendida esta como a atividade que maior rendimento obtém do meio sem causar deterioração desnecessária de seus parâmetros ambientais;
- c) delimitar regiões com produtividade primária elevada, cuja vocação de uso aconselhe sua exclusão do fenômeno urbano, evitando sua consolidação ou deterioração por obras de infraestrutura, polígonos industriais, etc;
- d) estabelecer linhas de atuação para a valorização dos recursos naturais que se encontrem insuficientemente aproveitados, a fim de aumentar sua rentabilidade econômico-social;
- e) fornecer aos organismos de gestão da administração, ferramentas de trabalho realizadas com critérios objetivos, de fácil manejo e que reúnam informações significativas a fim de orientar as possíveis atuações sobre o meio.

Grecchi (1998) salienta a importância da cartografia geoambiental como instrumento de planejamento tanto com enfoque local quanto regional. Para a autora, a cartografia geoambiental busca compreender a relação entre os componentes do meio físico, juntamente

com a consideração de fatores biológicos e o conflito destes com o uso e ocupação atual e prevista do solo.

O ato de mapear significa delinear áreas homogêneas ou “aceitavelmente” heterogêneas para uma determinada finalidade, sendo apresentado em 2D (bi-dimensão) e tendo seus atributos essenciais representados por letras, números e símbolos (ARAUJO, 2011)

Conforme Amorim (2003), zoneamentos geoambientais se propõem a avaliar e planejar o uso do solo, tomando como base os principais atributos do meio físico. O zoneamento geoambiental visando ao planejamento e ao ordenamento territorial pode ser enquadrado como ramo da Geologia Ambiental, resultado de uma série de caracterizações: geológica, geomorfológica, hidrológica, de recursos naturais, científicos, paisagísticos e culturais (GRECCHI, 1998).

Realizar um zoneamento geoambiental consiste em caracterizar uma área com relação às suas aptidões e restrições às atividades em desenvolvimento e/ou prováveis de serem implantadas (SILVA, 2007). Permite também indicar porções do terreno com uma maior qualidade ambiental que possam ser preservadas (GRECCHI, 1998).

Assim, o zoneamento geoambiental tem se destacado como instrumento estratégico do planejamento local e regional e pode dar uma grande contribuição para o parcelamento do solo e definição de usos específicos (SILVA, 2005).

“A base do gerenciamento geoambiental, entendida do prisma de ordenação territorial, é constituída pelas técnicas de zoneamento, resultando num plano de ocupação do espaço e uso dos recursos. Esse plano definirá as unidades ambientais em termos de área para uso intensivo, extensivo, de preservação e de uso múltiplo. O tipo de uso recomendável dependerá das vocações naturais, das restrições encontradas e das demandas por bens e serviços (DIEGUES, 2001).”

Cendrero e Diaz de Téran (1987, apud CENDRERO, 1990), elaboraram um esquema baseado nas principais linhas metodológicas internacionais de estudos geoambientais (Figura 3.1).

Nesse contexto, vale destacar o mapeamento geotécnico como um subsídio para estudos geoambientais. Para Fontes (2004), o mapeamento geotécnico é uma ferramenta

essencial no estudo do meio físico, refletindo desde a avaliação dos problemas geoambientais existentes até a formulação de orientações de uso do solo.

Figura 3.1 - Esquema das principais linhas metodológicas para elaboração de mapas geoambientais (CENDRERO e DÍAZ de TERÁN apud CENDRERO, 1990).

Segundo Zuquette (1987), o mapeamento geotécnico é uma ferramenta fundamental para orientar e auxiliar as mais diversas atividades antrópicas capazes de modificar o meio físico, ressaltando que esses mapas podem ser utilizados como fonte de informação para o planejamento urbano e regional.

A cartografia geotécnica reflete desde a avaliação dos problemas do meio físico até a formulação de orientações de uso. O grande valor do Mapeamento Geotécnico está no estabelecimento prévio de um modelo que expresse o conjunto de recursos, de condicionantes e de fenômenos atuantes do meio físico, de modo que os mapas possam ser aproveitados em ações disciplinadoras do uso do solo e preventivas (PRANDINI et al., 1991). A caracterização de possíveis modificações das condições naturais do meio físico, devido ao desenvolvimento de atividades antrópicas, é possível mediante o uso de geoindicadores. Segundo a IUGS (*International Union of Geological Sciences*) (2012), os referidos parâmetros

consistem de atributos e/ou processos do meio, capazes de servir como forma de identificação e quantificação de alterações no meio.

Segundo Varnes (1974), para efetivação de um mapeamento geotécnico, são realizadas operações básicas de adição, seleção, generalização e transformação das informações referentes à litologia e estruturas dos solos e rochas, hidrogeologia, geomorfologia e geologia.

3.2 Ciclo hidrológico

“A água distribui-se na atmosfera e na parte superficial da crosta até uma profundidade de aproximadamente 10km abaixo da interface atmosfera/crosta, compondo a hidrosfera, que consiste em uma série de reservatórios como os oceanos, geleiras, rios, lagos, vapor de água atmosférica, água subterrânea e água retida nos seres vivos” (KARMANN, 2001).

As relações entre as várias formas de ocorrência da água se processam dentro de um sistema fechado denominado ciclo hidrológico (JORGE e UEHARA, 1998), processo mais importante da dinâmica externa da Terra. É um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (SILVEIRA, 2001).

Vários autores, como Villela e Mattos (1975), Jorge e Uehara (1998), Karmann (2001), Silveira (2001), Cançado (2003), descrevem o ciclo hidrológico. Seus principais componentes são: Precipitação, Interceptação, Infiltração, Escoamento Superficial e Evapotranspiração (Figura 3.2).

Segundo Hirata (2001), de 119.000km³/ano da precipitação que caem sobre os continentes, aproximadamente 72.000km³/ano (60%) de água retornam à atmosfera por evapotranspiração. O excedente de água doce pode ser decomposto no escoamento superficial e subterrâneo.

O ciclo da água inicia-se com o vapor d'água que sofre transporte por meio do movimento de massas de ar; sob determinadas condições, o mesmo é condensado e forma

nuvens que podem resultar na transferência da água da atmosfera para a superfície terrestre, a precipitação.

Figura 3.2 - Ciclo Hidrológico (Karmann, 2001).

A precipitação pode ocorrer na sua forma mais comum, como chuva e neve ou granizo. A primeira forma ocorre quando há aglutinação e crescimento de microgotículas de água que atingem tamanho e peso suficientes para que a força de gravidade supere a turbulência e forças ascendentes, e a segunda ocorre quando o vapor d'água transforma-se diretamente em cristais de gelo.

Quando a precipitação cai, sob forma de chuva, neve ou granizo, sobre áreas com cobertura vegetal, uma parte do volume precipitado sofre interceptação devido a sua retenção por folhas e caules. Após a interceptação, a água pode sofrer a evaporação ou re-precipitação para o solo, com uma redução do impacto das gotas da chuva.

Quando a água atinge o solo, pode seguir diversos caminhos. Devido à porosidade do solo, há infiltração da água de precipitação que chega ao solo, até sua saturação; a partir desse momento, a taxa de infiltração sofre redução gradual até uma taxa residual; o excedente hídrico gera o escoamento superficial.

A parcela de água que infiltra no solo é guiada pela força gravitacional, preenche os vazios do subsolo, seguindo em profundidade, onde abastece o corpo hídrico subterrâneo. A outra parcela de água escoar superficialmente no terreno e converge para cotas mais baixas, formando uma rede de drenagem.

Vale lembrar que parte da água de infiltração retorna à superfície através de nascentes, alimentando o escoamento superficial ou, através de rotas de fluxo mais profundas e lentas, reaparecendo diretamente nos oceanos.

Para fechar o ciclo hidrológico, a água presente na superfície da terra é transferida para a atmosfera pela evapotranspiração, que consiste na soma dos processos de: evaporação direta durante o trajeto da água até a superfície terrestre, evaporação durante o escoamento superficial e subterrâneo, ambas dependentes da ação da radiação solar, de tensões de ar e de ventos; e transpiração devida à atividade biológica de organismos (principalmente plantas, através da respiração). Na evaporação, a maior contribuição é dos oceanos, por cobrirem a maior parte da superfície terrestre.

Estudos envolvendo o ciclo hidrológico são conduzidos com maior interesse na fase terrestre (SILVEIRA, 2001). Para Whitehead e Robson (1993), para se compreender os processos que controlam o movimento de água e impactos decorrentes de mudanças de uso do solo e quantidade e disponibilidade de água, é necessária a realização de um balanço hídrico associado a bacias hidrográficas.

Assim, Karmam (2001) e Silveira (2001) afirmam que a unidade geográfica fundamental para os estudos hidrológicos é a bacia hidrográfica por constituir um sistema físico onde é possível quantificar o ciclo de água. O ciclo hidrológico tem aplicação prática em estudos de recursos hídricos que visam a avaliar e monitorar a quantidade de água disponível na superfície da Terra (KARMANN, 2001).

Apesar de parecer contínuo, o movimento de água nas fases do ciclo hidrológico é bastante aleatório, variando no tempo e no espaço. Podem ocorrer extremos climáticos, como excessos e deficiências hídricas que levam a inundações e secas com risco potencial à sociedade.

Para Vilela e Matos (1975), esses extremos de enchente e de seca são os eventos que mais interessam para engenharia, pois muitos dos projetos de hidráulica são feitos com a finalidade de proteção contra esses episódios.

3.3 Bacia hidrográfica

Vilela e Mattos (1975), Jorge e Uehara (1998), Silveira (2001), Karman (2001) definem a Bacia Hidrográfica como um sistema físico, ou região definida topograficamente por divisores de água, que correspondem aos pontos mais elevados do terreno que separam bacias adjacentes. Nesse sistema, toda água precipitada converge até seu exutório por meio do escoamento superficial, que forma uma rede de drenagem, considerando as perdas intermediárias como volumes evaporados, transpirados e infiltrados profundamente.

Para Silveira (2001), esse sistema compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que convergem os escoamentos até o exutório. Esse conjunto de cursos d'água (rede de drenagem) está estruturado para conduzir a água e os detritos que lhe são fornecidos pelos terrenos da bacia de drenagem (JORGE e UEHARA, 1998).

3.3.1 Bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento hidrológico e ambiental

Em 1981, foi promulgada a Lei de Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6938/1981), criando o SISNAMA (Sistema Nacional de Meio Ambiente) e o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) e, dessa forma, foram formuladas diretrizes de avaliação de impactos, planejamento e gerenciamento, de zoneamentos ambientais, usando como unidades de planejamento as bacias hidrográficas. Surge, assim, em nível nacional, a proposta de planejamento ambiental como forma de orientação do ordenamento territorial.

O item III do artigo 5º da Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 01/1986, relata: "... definir os limites da área geográfica a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada de área de influência do projeto, considerando, em todos os casos, a bacia hidrográfica na qual se localiza."

Vilela e Matos (1975) destacam as bacias hidrográficas como regiões hidrológicas de importância prática para os hidrologistas, devido à simplicidade que oferecem na aplicação do balanço de água. Para Tundisi (2002), o uso dessa unidade natural possibilita uma visão sistêmica e integrada devido, principalmente, à clara delimitação e à natural interdependência de processos climatológicos, hidrológicos, geológicos e ecológicos. Dessa maneira, pode-se justificar o desenvolvimento de estudos nessas unidades territoriais.

A realização de estudos hidrológicos associados a bacias hidrográficas surgiu da necessidade de se descrever o balanço hídrico nestas e de se compreender o comportamento dos processos que controlam o movimento da água e os impactos decorrentes das mudanças do uso do solo sobre a quantidade e disponibilidade de água (WHITEHEAD e ROBINSON, 1993).

Segundo Pires, Santos e Delpretti (2002), o conceito de bacia hidrográfica tem sido cada vez mais utilizado e expandido como unidade de gestão da paisagem na área de planejamento ambiental, no que se refere ao uso dos recursos da água dos fluxos de sedimentos e nutrientes.

Santos (2004) ressalta que a dimensão da bacia hidrográfica em estudo tem influência sobre os resultados e que as bacias hidrográficas menores facilitam o planejamento, tendo em vista razões técnicas e estratégicas.

Segundo Rodrigues e Mendiando (2013), a dimensão ideal para a avaliação das bacias ainda é um tema muito discutido, pois depende do fator de interesse. Dessa forma, a bacia hidrográfica pode ser analisada de forma gradativa e ser subdividida em unidades menores, realizando-se assim, uma setorização conforme critérios próprios, considerados relevantes para a análise.

Esta unidade de análise permite envolver tanto os principais processos hidrológicos que subsidiam a mensuração da disponibilidade hídrica, como os impactos do conjunto de atividades humanas presentes nos limites da bacia.

Para Rodrigues e Mendiando (2013), no Brasil, a adoção de bacias hidrográficas como unidade de gestão de recursos hídricos possui vantagens e desafios. Segundo os referidos autores, o modelo de gestão por bacias hidrográficas brasileiro ainda necessita de ajustes no contexto institucional.

3.4 Balanço hídrico

Segundo Karmann (2001), Chevallier (2001), Jorge e Uehara (1998), Vilela e Matos (1975), a análise quantitativa do ciclo da água normalmente é realizada por meio de um balanço hídrico sobre o sistema físico denominado bacia hidrográfica, unidade básica de estudos hidrológicos. “A bacia contém de um lado a noção topográfica de divisor de água e de outro a noção de área de interceptação das precipitações” (CHEVALLIER, 2001).

O balanço hídrico corresponde a uma análise comparativa entre a quantidade de água que entra (input) e que sai (output) do sistema, levando-se em conta as variações das reservas hídricas superficiais e subterrâneas, durante um período de tempo adotado, freqüentemente anual (JORGE e UEHARA, 1998). Segundo Michell, apud Rodrigues e Mendiondo (2013), a escala temporal do cálculo do balanço hídrico pode ser desde anual à horária, ou ainda mais detalhada, dependendo da quantidade de dados disponíveis.

O fluxograma da Figura 3.3 demonstra a distribuição da precipitação no sistema, segundo Viessman e Lewis (1995).

Figura 3.3 - Distribuição da precipitação de entrada (adaptado de Viessman e Lewis, 1995).

Um balanço hídrico envolve de um lado, como entrada, a precipitação e de outro, como saída, o escoamento superficial, a infiltração e a evapotranspiração. Villela e Mattos (1975) e Viessman e Lewis (1995) afirmam que o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser representado pelas expressões matemáticas descritas nas Equações 3.1, 3.2 e 3.3. As referidas equações podem ser melhor compreendidas pelo esquema de balanço hídrico em uma bacia hidrográfica, apresentado na Figura 3.4.

- Balanço hídrico acima da superfície

$$P - R + RG - ES - TS - I = Ss$$

Equação 3.1

- Balanço hídrico abaixo da superfície

$$I = G1 - G2 - Rg - Eg - Tg = Sg$$

Equação 3.2

- Balanço hídrico na bacia hidrográfica

$$P - R - (Es + Eg) - (Ts + Tg) - (G2 - G1) = (Ss + Sg)$$

Equação 3.3

Figura 3.4 - Esquema de Balanço Hídrico em uma Bacia Hidrográfica (adaptado de VILLELA e MATTOS, 1975 e VIESSMAN e LEWIS, 1995).

Karman (2001) afirma que o balanço hídrico, na hidrologia, pode ser representado pela seguinte expressão básica:

$$P - E - Q(\pm\Delta S) = 0$$

Equação 3.4

Onde:

- “P” representa o volume de água precipitado sobre a área da bacia;
- “E” representa o volume que voltou à atmosfera por evaporação e transpiração;
- “Q” representa volume total de água escoado pela bacia, durante um intervalo de tempo. Representa a “produção” de água pela bacia, medida pela vazão no exutório durante o período de monitoramento;
- “ΔS” representa as variações positivas e negativas devido ao armazenamento no interior da bacia.

Para Karman (2001), o armazenamento ocorre na forma de água retida nas formações geológicas do subsolo, cujo fluxo é muito mais lento que o do escoamento superficial direto. Considerando-se períodos de monitoramento mais longos (ciclos anuais), as diferenças positivas e negativas do armazenamento tendem a se anular. Os valores positivos ocorrem quando o escoamento total da bacia é alimentado pela água subterrânea (períodos de estiagem), enquanto os negativos refletem períodos de recarga (época de chuvas), quando parte da precipitação sofre infiltração, realimentando a água subterrânea, em vez de escoar diretamente da bacia. Dessa forma, pode-se resumir a equação geral do balanço hídrico para:

$$P = E - Q$$

Equação 3.5

Onde:

- “E” representa o volume de água perdida por evapotranspiração

- “Q” representa a vazão total da bacia que consiste na soma do escoamento superficial direto com o escoamento da bacia suprido pela água subterrânea

Infelizmente, não é simples mensurar fisicamente os parâmetros que intervêm no balanço hídrico, que segue uma simples formulação de conservação de massas.

Chevallier (2001) divide os parâmetros hidrológicos nas três seguintes categorias:

- parâmetros característicos do meio receptor, tais como: geologia, topografia, solos, vegetação e urbanização;
- parâmetros do escoamento, como descargas líquida e sólida e parâmetros secundários ligados aos primeiros, como nível d’água, características da rede de drenagem, área da bacia delimitada pela rede de drenagem, velocidade, qualidade da água e dos sedimentos transportados, reservatórios naturais e artificiais, entre outros;
- parâmetros climáticos, como a precipitação, a evapotranspiração e parâmetros climáticos secundários, ligados aos primeiros, como radiações solares, temperaturas, umidade do ar, vento, entre outros;

Para Chevalier (op. cit.) não é suficiente medir esses parâmetros, é necessário também processar, corrigir e dar consistência aos dados medidos da maneira mais eficiente possível.

Assim, os principais aspectos a serem considerados no balanço hídrico são:

a) evaporação e evapotranspiração

A evaporação e a evapotranspiração ocorrem quando a água líquida é convertida para vapor de água e transferida, neste estado, para a atmosfera através de difusão molecular e turbulenta.

Para Tucci e Beltrame (2001), a evaporação é o processo físico no qual um líquido ou sólido passa ao estado gasoso, e a evapotranspiração corresponde à perda de água por evaporação a partir do solo e transpiração de plantas. A intensidade desses processos depende da radiação solar, das superfícies livres de água, da temperatura do ar, vento e pressão de vapor. Em solos

parcialmente saturados, a intensidade da evaporação também é influenciada pela condutividade hidráulica dos solos.

b) Precipitação

A precipitação consiste em toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre sobre forma de neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. Por sua capacidade para produzir escoamento, para hidrologia, a chuva é considerada o tipo mais importante de precipitação.

A precipitação em uma bacia durante o ano é o fator determinante para quantificar a sua disponibilidade hídrica para os diversos tipos de usos da água. Para Bertoni e Tucci (2001), a determinação da intensidade da chuva é importante para o controle de inundação e da erosão do solo.

c) Interceptação

A interceptação consiste na retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo (BLAKE, 1975 em TUCCI, 2001). Esse processo ocorre pela obstrução ao escoamento por parte da cobertura vegetal, artificial ou cultural. Ele exerce interferência sobre o balanço hídrico da bacia hidrográfica, armazenando uma parcela da precipitação para consumo. Para Tucci (2001), a interceptação reduz a variação da vazão ao longo do ano, de forma a reduzir e retardar picos de cheias.

Jorge e Uehara (1998) afirmam que, devido às relações de equilíbrio existentes entre a vegetação primitiva e o solo, adquiridas ao longo de centenas ou mesmo milhares de anos, esse tipo de cobertura do terreno tem maior ação de interceptação e, conseqüentemente, proteção ao impacto da chuva. Helvey e Patric, apud Tucci (2001), indicam que, em regiões úmidas e com florestas, a interceptação anual pode chegar a 250mm.

Na Figura 3.5, nota-se a influência da cobertura vegetal na distribuição da água de chuva pelos fenômenos de interceptação, escoamento pelos troncos e retenção na serrapilheira.

Após a interceptação da chuva, a parcela de água que fica retida na vegetação e na serrapilheira pode sofrer evaporação, e a parcela de água que atinge o solo, também denominada precipitação terminal ou precipitação efetiva, pode se infiltrar e, posteriormente, ser extraída pelas raízes por meio da transpiração ou atingir o lençol freático.

A interceptação vegetal depende de vários fatores: características da precipitação e condições climáticas, tipo e densidade da vegetação e período do ano (TUCCI, 2001). Jorge e Uehara (1998) ressaltam que o papel da cobertura vegetal na distribuição de águas deve ser analisado para cada região pela variabilidade no espaço e no tempo de seus fatores intervenientes, tendo em vista que tais parâmetros (solo, relevo, geologia, clima, flora e fauna) são variáveis no espaço e no tempo.

Figura 3.5 - Influência da cobertura vegetal na distribuição da água da chuva (Prandini et al., 1976, 1982 apud Jorge e Uehara, 1998).

d) Armazenamento em depressões

Na bacia hidrográfica existem obstruções naturais e artificiais ao escoamento, acumulando parte do volume precipitado. As depressões do solo ou a baixa

capacidade de drenagem podem provocar a retenção de grandes volumes de água que, por sua vez, sofrem infiltração e principalmente evaporação, o que leva à redução da vazão média da bacia (TUCCI, 2001).

Logo após a enchente, a saída de água se dá principalmente por evaporação, devido à baixa taxa de infiltração do solo após esse tipo de evento. Isso é mais grave em solos que se impermeabilizam com a umidade, como o argiloso. Assim, bacias de baixa densidade de drenagem tendem a ter menor vazão média e maior capacidade de regularização natural do escoamento.

Em bacias urbanas, podem ser criadas artificialmente áreas com retenção do escoamento em função de aterros, pontes e construções. O somatório dessas perdas se reflete na redução da vazão média e no abatimento dos picos de enchentes. Em grandes bacias, as retenções podem funcionar como reservatórios distribuídos. O volume desses reservatórios pode ser estimado cartograficamente.

e) Escoamento superficial

O escoamento superficial é a parte do ciclo hidrológico em que a água que precipita permanece na superfície do terreno e se desloca na bacia, pela ação da gravidade, que a conduz para as cotas mais baixa até encontrar uma calha definida.

Segundo Silva et al. (2005), o escoamento superficial abrange desde o excesso de precipitação ao deslocamento da água pela superfície do terreno até o escoamento de um rio, que pode ser alimentado tanto pelo excesso de precipitação como pelas águas subterrâneas. A vazão ou o volume escoado por unidade de tempo é a principal grandeza que caracteriza um escoamento superficial em hidrologia.

Para os hidrologistas, esse processo consiste em uma das parcelas mais importantes do ciclo hidrológico e é representado quantitativamente por variáveis como: vazão, profundidade e velocidade.

Conforme Rubin (1966), o escoamento superficial só ocorre quando a intensidade da precipitação é superior à capacidade de infiltração do terreno, ou seja, o escoamento é controlado pela capacidade de infiltração do terreno.

Jorge e Uehara (1998) citam que as taxas de escoamento superficial dependem de características hidráulicas dos solos e das rochas, da cobertura vegetal, de estruturas biológicas, da forma da bacia, da declividade, do teor de umidade do solo e do uso e ocupação do terreno. Tucci (1998) destaca como principais parâmetros na definição do comportamento do escoamento superficial: a cobertura da bacia, a declividade e o sistema de drenagem.

Villela e Mattos (1975) destacam que, em áreas antropizadas, deve-se considerar que as diversas formas de uso do solo intensificam ou atenuam o escoamento superficial.

f) Infiltração

A infiltração consiste na passagem de água da superfície para o interior do terreno (SILVEIRA, LOUZADA E BELTRAME, 2001 E JORGE E UEHARA, 1998). A capacidade de infiltração de um solo é definida como a taxa máxima pela qual a água pode ser absorvida pelo solo. À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo e o perfil de umidade tende à saturação e uma gradativa redução da taxa de infiltração.

Deve-se ressaltar que a infiltração influencia nas características hidrológicas dos cursos d'água. Segundo Jorge e Uehara (1998), os rios permanentes, mesmo durante os períodos de seca, são mantidos pela descarga de água subterrânea armazenada nos aquíferos. Rios intermitentes, geralmente, estão drenando a água que permaneceu na superfície e não se infiltrou, apresentando um fluxo muito variável, com grandes cheias ou pequenas vazões de permanência.

Karman (2001), Silveira, Louzada e Beltrame (2001) e Jorge e Uehara (1998) destacam como fatores que influenciam na capacidade de infiltração: a disponibilidade de água, a natureza e a topografia do terreno, o grau de saturação antecedente, o uso e ocupação do terreno e a cobertura vegetal.

Conforme é mostrado no item 3.8, o balanço hídrico pode ser realizado em diversas escalas e sob diferentes abordagens. Vislumbrando o planejamento territorial e o gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas, é de essencial importância uma avaliação de demandas hídricas considerando atividades antrópicas e alterações nos padrões de uso e ocupação territorial.

3.5 Estimativa de aspectos climáticas

A compreensão de cada componente do ciclo hidrológico, incluindo parâmetros climáticos, é de suma importância para obtenção de parâmetros básicos para fins de gerenciamento de bacias.

Para entender os fenômenos climáticos, deve-se diferenciar o tempo de clima (RODRIGUES E MENDIONDO, 2012). Bohner e Antonic (2009) explicam que o clima usualmente é definido como condições de tempo calculadas sobre um período de tempo ou, mais precisamente, a descrição estatística de variáveis relevantes sobre períodos de meses, milhares e milhões de anos.

O tempo é caracterizado por um estado instantâneo e efêmero das condições atmosféricas (RODRIGUES E MENDIONDO, 2012).

Segundo Bohner e Antonic (2009), a meteorologia estuda sistemas meteorológicos de curta duração de até algumas semanas, já a climatologia analisa a frequência com que esses sistemas meteorológicos ocorreram no passado.

Vianello e Alves (1991) destacam a relevância do zoneamento climatológico como ferramenta para subsidiar a implantação e planejamento de diversas áreas de desenvolvimento socioeconômico e ecológico de uma região.

3.5.1 Fatores que influenciam no clima

O clima é influenciado/determinado por diversos fatores, os principais são a latitude, a altitude e o albedo. O Quadro 3.1 mostra, de maneira resumida, a influência dos referidos fatores sobre o clima.

Quadro 3.1 - Influência da latitude, a altitude e do albedo à superfície sobre o clima.

Parâmetro	Variável climática influenciada	Influência	
Latitude	Temperatura	inversamente proporcional	Quanto mais próximo ao equador maior a concentração de raios solares.
Altitude	Temperatura	inversamente proporcional	A Refletância dos raios solares varia com a concentração do ar. Em baixas altitudes o ar é mais concentrado e tem maior capacidade de acumular calor.
Albedo - índice de reflexão dos raios solares	Acumulo de calor	diretamente proporcional	Quanto maior a reflexão menor o calor acumulado. Assim, as diferentes reflexões exercidas pelo uso do terreno levam a variações térmicas.

A dinâmica espaço-temporal da formação de nuvens e precipitação é comprometida pela superfície do terreno. Segundo Bohner e Antonic (2009), essa relação é muito mais complexa que os efeitos discutidos anteriormente, devido à alternância de processos induzidos térmica e dinamicamente, afetando o desenvolvimento de nuvens e de precipitação.

Um exemplo citado por Bohner e Antonic (op. cit.) ocorre em altas cadeias de montanhas subtropicais e tropicais, como os Himalayas ou os Andes, onde a circulação termicamente induzida durante o dia pode ser evidente, mesmo em características fitofisionômicas de vegetação, variando de vegetação semidesértica em vales secos acima da formação de florestas úmidas em declividades superiores.

Trabalhos atuais, no campo da climatologia, mostram efeitos topograficamente induzidos ou determinados em processos atmosféricos ou climáticos, variando amplamente em termos de escalas espaço-temporais e de complexidade.

Os níveis de radiação solar variam principalmente em função do horário do dia, da época do ano e do relevo. ESRI (2013) destaca como fatores de suma importância da distribuição espacial da radiação solar as seguintes características topográficas do terreno: orientação, elevação, inclinação, aspecto e sombras.

3.5.2 Principais parâmetros a serem estimados para fins de gerenciamento de recursos hídricos

A precipitação e a evapotranspiração são os principais componentes climáticos a serem quantificados no balanço hídrico do solo e de bacias hidrográficas. A temperatura do

ar, dentre os elementos climáticos, promove os maiores efeitos diretos e significativos sobre muitos processos fisiológicos que ocorrem em plantas e animais, sendo importante o seu conhecimento em estudos de planejamento agrícola (NOVAES, 2005).

Logo, os principais parâmetros climáticos a serem estimados para fins de avaliação da disponibilidade hídrica de bacias são a precipitação, a temperatura e a evapotranspiração.

Para Marcuzzo, Andrade e Melo (2011), uma correta análise da distribuição de precipitações pluviométricas é de suma importância para o planejamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas, além de dar suporte a estudos climáticos e meteorológicos.

A precipitação consiste no principal componente de entrada do ciclo hidrológico e é através dela que se dá a entrada de água na bacia hidrográfica. O seu comportamento no espaço e no tempo é um dos principais responsáveis pelas respostas hidrológicas da bacia hidrográfica (MELLO E SILVA, 2009).

A distribuição espaço-temporal da precipitação em uma bacia é determinante para quantificar a sua disponibilidade hídrica. A determinação da intensidade dessa variável é importante para o controle de inundação e de erosão do solo (BERTONI E TUCCI, 2001).

As taxas de escoamento superficial e infiltração estão ligadas às características de precipitação. As oscilações comportamentais do regime pluviométrico podem levar a expressivos prejuízos às atividades agrícolas e ao abastecimento de água (MELLO E SILVA, 2009).

A evapotranspiração é responsável por quase todo o volume de água transferido dos continentes para a atmosfera. Esse processo desempenha um papel de suma importância na liberação de calor latente (LE), cujo valor integrado no tempo é importante para diferentes aplicações em estudos de hidrologia, agronomia e modelagem atmosférica (VETORAZZI, 2011).

Meireles (2007) cita que informações a respeito da evapotranspiração são úteis para o planejamento da irrigação, regulamentação de direitos de uso da água e estudos hidrológicos de bacias hidrográficas. Assim, conjecturando o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos, o processo de evapotranspiração deve ser compreendido (ALLEN, 2002).

Diversos fatores exercem influência sobre a evapotranspiração, dentre eles pode-se destacar: fatores de manejo do solo e gestão das condições ambientais e, principalmente,

parâmetros de tempo, como a radiação solar, a temperatura de superfície, a temperatura, a umidade relativa do ar e o vento.

Allen (2002) afirma que a estimativa da evapotranspiração, com melhor precisão e confiabilidade, é essencial em estudos que envolvem programação de irrigação, planejamento e manejo de recursos hídricos. O autor justifica essa afirmativa devido ao fato de ocorrerem elevadas taxas de perdas d'água para a atmosfera, através do referido processo, sendo esse um dos componentes mais importantes do balanço hídrico.

Entre procedimentos usualmente empregados para medir ou estimar a evapotranspiração, podem-se citar: medidas diretas, métodos baseados na temperatura, métodos baseados na radiação, método combinado e o balanço hídrico (TUCCI e BELTRAME, 2001).

É difícil estabelecer o valor exato da evapotranspiração real. Contudo, para Tucci e Beltrame (2001), a conjugação de informações associadas à evapotranspiração potencial (ETP) possibilitam estimativas confiáveis para a maioria dos objetivos. Tucci e Beltrame (op. cit.) afirmam que métodos baseados na radiação solar são mais confiáveis e que, indiscutivelmente, o método combinado ou equação de Penman, que se baseia no balanço de energia e em características aerodinâmicas do processo, consiste na melhor opção para estimativa da evapotranspiração potencial.

Vale destacar a expressão de Thornthwaite que é amplamente utilizada (apesar de ter precisão inferior à equação de Penman) pelo fato de que o modelo de Thornthwaite e Matter (1955) exige um único parâmetro de entrada, a temperatura.

A análise espaço-temporal da temperatura é importante uma vez que esse é um parâmetro diretamente correlacionado à evapotranspiração e que pode ser mais facilmente obtido, via monitoramentos de dados pontuais.

De maneira simples, diversos autores definem a temperatura atmosférica como a energia contida no meio e que, ao longo do dia, oscila entre dois valores extremos (temperaturas máxima e mínima). Além da variação diária de temperatura, há variação ao longo do ano, conforme a intensidade e ângulo de incidência da radiação solar.

Segundo ESRI (2013), a distribuição espacial e temporal da radiação contribui para a variabilidade do microclima, incluindo variações nos regimes de temperatura do ar e do solo, evapotranspiração, padrões de umidade e luz disponível para a fotossíntese.

3.5.3 *Principais técnicas de análise de séries de dados climatológicos e zoneamento climático*

A delimitação das regiões, com aspectos climatológicos homogêneos, permite não só estabelecer os indicadores do potencial do meio físico e biótico para a região em estudo, mas também, juntamente com as delimitações das áreas homogêneas, sob o ponto de vista socioeconômico, contribui para o desenvolvimento sustentável da região (CARVALHO et al., 2008).

Ávila, Mello e Viola (2009) citam que atualmente um dos principais ramos da pesquisa em hidrologia e climatologia consiste na geração de mapas que possam subsidiar a implantação de projetos agrícolas e ambientais por meio da interpolação e análise espacial, representando espacialmente a distribuição da variável climática analisada.

Para efetivação do zoneamento climático, faz-se necessária à análise de séries temporais, mensurações pontuais e a regionalização de variáveis climatológicas.

Dentre as análises de séries temporais, pode-se destacar:

- análise de consistência de séries temporais,
- análises de regressão e preenchimento de falhas no monitoramento,
- análises de frequência de eventos e
- análises de potencialidades de ocorrência de eventos extremos (chuvas intensas, secas).

Para Bohner e Antonic (2009), as abordagens de regionalização de variáveis climatológicas aplicam métodos que podem ser diferenciados em: técnicas de interpolação, análises de regressão espacial e abordagens de modelagens de dinâmica climática. O autor destaca a krigagem universal ou splines como a técnica de mapeamento mais comumente utilizada para interpolação variáveis mensuradas pelas estações de monitoramento climático.

As séries históricas de observação de dados climáticos normalmente apresentam falhas de observação. Nesses casos, pode-se recorrer a processos de preenchimento de falhas, por meio de análises de regressão, a partir de amostras de processos ocorridos na mesma região (TUCCI E BERTONI, 2001).

Os processos hidrológicos são aleatórios; contudo, os dados observados de um determinado processo hidrológico podem ser submetidos à análise estatística visando à definição de probabilidades de ocorrência de eventos (TUCCI E BERTONI, 2001).

Para a análise de probabilidade de ocorrência de eventos, usualmente são utilizadas curvas de permanência e histogramas de frequência. Contudo, segundo Tucci e Bertoni (2001), a relevância das análises é limitada ao tamanho da amostra.

Geralmente, para estimar chuvas intensas, trabalha-se com regressão múltipla não linear, utilizando-se de séries históricas de dados de chuvas máximas com vários tempos de duração extraídos de pluviogramas. Contudo, quando não se dispõe de dados de curto período de duração, é possível estimar chuvas máximas aplicando-se o processo de desagregação de chuvas, comumente empregado (MARCUIZZO; ANDRADE E MELO, 2011).

De um modo geral, as técnicas de interpolação consideram somente dados provenientes de observações pontuais; assim, a aplicação dessas técnicas limita-se a regiões topograficamente simples com distribuição de pontos mais ou menos regulares. Segundo Bohner e Antonic (2009), a maior exceção é a abordagem universal da krigagem que possibilita a integração entre o controle de parâmetros da superfície do terreno (elevação, inclinação ou aspecto) e, por isso, consiste em uma poderosa e adequada estratégia de regionalização, na maioria dos terrenos. Contudo, o autor conclui que, para a obtenção de resultados satisfatórios, necessita-se de uma distribuição de dados de entrada maior ou menor e uma adequada representação de configurações topo-climatológicas.

Para realizar o mapeamento da precipitação mínima provável associada a um período, local e frequência de ocorrência, Ávila, Mello e Viola (2009) lançaram mão do método geoestatístico da co-krigagem. No referido trabalho, foram testados os modelos exponencial e esférico, pelos métodos de ajuste da máxima verossimilhança (MV) e de mínimo dos quadrados ponderados (MQP); além disso, analisou-se a anisotropia do fenômeno, por meio da construção dos semivariogramas experimentais.

A krigagem minimiza a variância dos erros; contudo, gera isolinhas não muito suaves e em pequenas quantidades, que podem conter muitos dados de valores de precipitação pluviométrica em isolinhas de valores diferentes se a quantidade de pontos for muito esparsa (MARCUIZZO; ANDRADE e MELO, 2011). Melo Júnior et al. (2006), estudando a distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, observaram, de modo geral, que o interpolador geoestatístico em questão proporciona boas estimativas dos totais médios anuais de chuva.

Marcuzzo, Andrade e Melo (2011) estudaram detalhadamente os métodos de interpolação matemática que geram regionalização de pontos por isolinhas. Os dados pontuais de precipitação foram submetidos aos métodos de interpolação matemática IDW, Krigagem, Spline de tensão e Topo-to-Raster.

Marcuzzo, Andrade e Melo (op. cit.) concluíram que, para a área estudada por eles, o método Topo-to-Raster, sem enforce, tanto para períodos secos quanto chuvosos, apresentou-se mais vantajoso. Além disso, concluíram que o método Topo-to-Raster foi o que proporcionou as mais adequadas isoietas por apresentar a grande maioria dos pontos interpolados dentro das isolinhas com os valores pré-estabelecidos, além de possuir maior suavidade das isolinhas e por coincidir melhor com as características altimétricas da região.

Para estimar a radiação solar, geralmente são empregadas técnicas de interpolação, entretanto, a aplicação dessa metodologia é limitada a disponibilidade de estações climatológicas e não permite levar em consideração a variabilidade topográfica. Segundo Pescador et al. (2006), o uso de imagens de satélite e, mais recentemente, de modelos baseados em técnicas de SIG tem contribuído para resolver essa dificuldade.

Gastli e Charebi (2010), com o objetivo de calcular o potencial de geração de energia elétrica anual, aplicaram a metodologia de produção de mapas de radiação solar. Lançando mão de ferramentas GIS, os autores estimaram os níveis potenciais de radiação solar sobre a região de Oman (sudeste da Ásia) em diferentes épocas do ano.

Batista e Mafia (2009) avaliaram o uso da ferramenta de modelagem da radiação solar com objetivo de selecionar áreas com maior potencial de ocorrência de áreas com plantações de eucalipto baseado nesse parâmetro. Os autores concluíram que o modelo criado é uma ferramenta boa e fácil para a seleção de áreas em função da radiação solar.

Pescador et al. (2006) lançou mão do software “*Analyst solar*”, que utiliza informações topográficas para elaborar modelos de radiação. Os autores compararam os resultados com dados experimentais de 14 estações radiométricas, localizadas em uma área com topografia complexa, a região do Parque Natural da Serra Nevada (sul da Espanha). Os resultados obtidos no referido trabalho mostraram que essa ferramenta é útil para estimar a radiação em regiões topograficamente complexas; contudo, os resultados variam em função da resolução do MDE; os autores ressaltam a importância de considerar outros fatores, como o albedo, para obter melhores estimativas.

As metodologias convencionais para estimar os parâmetros geralmente apresentam incertezas, que aumentam quando a preocupação é o comportamento espacial de tais parâmetros.

A estimativa da temperatura da superfície terrestre, através de imagens termais, obtidas por sensoriamento remoto, é de considerável importância para muitas aplicações em oceanografia, estudos de mudanças climáticas, geologia, hidrologia e monitoramento da vegetação (SOBRINO et al., 1996).

Meireles (2007) cita que há várias equações, métodos e modelos desenvolvidos para estimar a evapotranspiração, com variáveis níveis de precisão. O referido autor mostra que, apesar de apresentar limitações, a estimativa desse parâmetro, através de imagens de satélite, traz inúmeras vantagens, tais como:

- como a imagem de satélite é formada através do conjunto de dados captados por sensores imageadores, que analisam o comprimento de onda obtido pelo satélite, dependendo do tipo de superfície imageada, pode-se supor que esse tipo de estimativa pode ser um grande avanço no processo de determinação de evapotranspiração para uma macrorregião e que o método do balanço de energia, através do uso de imagem de satélite, possa ser uma boa opção;
- obtêm-se valores tomados pixel a pixel, ou seja, os valores de evapotranspiração poderão ser extrapolados para uma área maior ou até uma região, diferentemente do que ocorre com dados locais;

- a água gasta no processo de evapotranspiração pode ser obtida diretamente sem a necessidade de quantificar outros parâmetros hidrológicos de difíceis determinações, como a umidade, por exemplo.

Nesse contexto, vale destacar o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), que foi desenvolvido em 1995 por Bastiaanssen (BASTIAANSSEN et al., 1998; BASTIAANSSEN, 2000). O SEBAL é um algoritmo semi-empírico que promove a parametrização do balanço de energia e fluxos de superfície baseado em alguns dados locais e medições espectrais de satélites (WELIGEPOLAGE, 2005).

No modelo SEBAL, a evapotranspiração é calculada a partir de imagens de satélite e dados climatológicos, a partir de um balanço de energia superficial, em que o fluxo de radiação na superfície (R_n) retrata a energia real disponível na superfície e é calculado a partir do equilíbrio entre os fluxos de entrada e saída de radiação.

Allen et al. (2005) lança mão de um modelo matemático de processamento de imagens de satélite para cálculo da evapotranspiração, o METRIC (variante do SEBAL), para prever, a partir de imagens Landsat, as taxas de evapotranspiração mensais e sazonais da região sul de Idaho. O autor afirma que o método de previsão de fluxos de evaporação real é um procedimento eficiente, preciso e relativamente barato.

Santos et al. (2010) realizou uma avaliação da eficiência do modelo SEBAL para estimar fluxos de energia na superfície do solo e evapotranspiração diária, em uma extensa área de fazendas de arroz irrigado em Paraíba do Sul (RS), utilizando dados do sensor ASTER. As estimativas foram comparadas com dados obtidos a partir de uma estação localizada na área estudada. Os autores concluíram que as estimativas mais precisas, dentre os parâmetros modelados, foram sensíveis ao calor e a evapotranspiração e o que apresentou maior erro foi o fluxo de calor no solo.

Meireles (2007) lançou mão do algoritmo SEBAL e do software Erdas IMAGE 8.5 para realizar a estimativa dos seguintes parâmetros: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), albedo (a), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), saldo de radiação (R_n), calor sensível (H), calor latente (λET) e evapotranspiração horária ($ET_{\text{horária}}$). O autor concluiu que há uma alta potencialidade de emprego do algoritmo em questão em estudos relacionados à desertificação, alterações na vegetação e uso da terra em escala de bacias hidrográficas, uma

vez que a identificação em mudanças de espécies pode ocorrer pelo estudo de cartas de calor latente ou evapotranspiração.

3.6 Estimativa de potencialidades de escoamento superficial e infiltração

Pejon e Zuquette (1993) enfatizam que informações sobre o escoamento superficial são muito importantes para a obtenção de coeficientes de deflúvios mais realistas. O coeficiente de escoamento ou coeficiente de deflúvio corresponde à razão entre o volume de água do escoamento superficial e o volume de água da chuva. Villela e Mattos (1975) apresentam uma série de valores de coeficiente de escoamento para diferentes características de bacias (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Valores do coeficiente de escoamento superficial C, em função das características das bacias (Villela e Mattos, 1975).

CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS	C (%)
Superfícies impermeáveis	90-95
Terreno estéril montanhoso: material rochoso ou geralmente não-poroso, com reduzida ou nenhuma vegetação e altas declividades	80-90
Terreno estéril ondulado: material rochoso ou geralmente não-poroso, com reduzida ou nenhuma vegetação em relevo ondulado e com declividades moderadas	60-80
Terreno estéril plano: material rochoso ou geralmente não-poroso, com reduzida ou nenhuma vegetação e baixas declividades	50-70
Áreas de declividades moderadas (terreno ondulado), grandes porções de gramados, flores silvestres ou bosques, sobre um manto fino de material poroso que cobre o material não-poroso	40-65
Matas e florestas de árvores decíduas em terreno de declividades variadas	35-60
Florestas e matas de árvores de folhagem permanente em terreno de declividades variadas	5-50
Pomares: plantações de árvores frutíferas com áreas abertas cultivadas ou livres de qualquer planta, a não ser gramas	15-40
Terrenos cultivados em plantações de cereais ou legumes, em zonas altas (fora de zonas baixas e várzeas)	15-40
Terrenos cultivados em plantações de cereais ou legumes, localizadas em zonas baixas e várzeas	10-30

Conforme Pejon e Zuquette (1993), os aspectos relativos às condições de escoamento superficial e de infiltração, geralmente não são estudados, o que dificulta a avaliação das modificações ambientais que poderão ocorrer quando se processar a ocupação. Ainda em trabalhos de mapeamentos geotécnicos, em que são abordados vários aspectos do meio físico, sendo que muitos deles estão relacionados aos fenômenos de escoamento superficial e infiltração; esses dados via de regra não são avaliados de maneira a se obter uma carta de potencial de escoamento superficial e infiltração.

Liporaci et al. (1999) elaboraram uma carta de potencial de escoamento superficial para região de Poços de Caldas-MG, utilizando um método de Cook (Cook et al., 1984). Para tanto, utilizaram-se de um Processo Analítico Hierárquico de atributos, que os ordenou em graus de importância decrescente conforme classes de declividades, densidade de canais de drenagem, tipo litológico, materiais inconsolidados (textura, gênese, espessura e permeabilidade) e feições favoráveis ao armazenamento superficial (planícies de inundação e barramentos). Posteriormente, atribuíram-se pesos às várias situações, possibilitando a subdivisão da área em classes.

A Carta de Potencial de Escoamento Superficial caracteriza as regiões com propensões ao acúmulo de águas, podendo ser útil na definição de coeficientes de deflúvios (“runoff”) ou de recargas de aquíferos.

Pejon e Zuquette (1993) apresentam uma metodologia para a elaboração da carta de escoamento superficial e infiltração, baseada na atribuição de pesos aos atributos do meio físico diretamente relacionados com os processos de escoamento superficial e de infiltração. No Quadro 3.3, pode-se notar a pontuação conferida aos atributos do meio físico quanto ao seu potencial de escoamento superficial e infiltração na região de Piracicaba (SP).

Quadro 3.3 - Pontuação de atributos do meio físico utilizados na classificação do potencial ao escoamento superficial e infiltração da região de Piracicaba (SP) (Pejon e Zuquete, 1993).

Atributos	← Potencial de escoamento aumenta					Peso
	Potencial de infiltração aumenta →					
Classes de escoamento superficial e infiltração	199-242 (5)	160-199 (4)	121-160 (3)	82 -121 (2)	>82 (1)	
Declividade (%)	>20 (25)	10 a 20 (20)	5 a 10 (12)	2 a 5 (8)	<2 (5)	3
Textura	Silto argiloso residual (ITAQUERI) (20)	Argiloso-siltoso residual (SERRA GERAL, QUATERN.) (15)	Argiloso poroso retrabalhado (CORUMBATAÍ) (10)	Arenoso <30% finos (SANTA RITA) (6)	Arenoso <20% finos (PIRACUN, PIRAMB, BOTUC.) (5)	2
Espessura (m)	< 0,5 afloramentos rochosos (15)	< 2 (12)	2 a 5 (8)	5 a 10 (6)	>10 (5)	2
Permeabilidade	10^{-6} (12)			10^{-4} (7)		1
Profundidade Nível d'água (m)	<0,5 (15)	0,5 a 3 (10)	3 a 5 (8)	>5 (5)		1
Litologia	Argilitos/Siltitos (CORUMBATAÍ) (10)	Magmatitos básicos (SERRA GERAL) (8)	Arenitos (ITAQUERI) (6)	Arenitos (STA. RITA, BOTUCATU, PIRAMBÓIA, PIRASSUN., QUATERN.) (5)		1
Feições favoráveis ao armazenamento superficial	Não apresenta (17)			Apresenta (6)		2
Densidade de drenagem (canais/km²)	2 a 5 (15)			Menos que 2 (8)		2

Onde: a numeração entre parênteses representa os pesos de cada classe dos atributos

Silva (2000) propôs um método de determinação do escoamento superficial de bacias com base no levantamento pedológico. O método apresentado fornece uma avaliação da água escoada das pequenas bacias hidrográficas nas zonas semi-áridas do Nordeste. Seu princípio consiste em determinar a lâmina escoada padrão a partir das classes de solos ou unidades de mapeamento que ocorrem na bacia hidrográfica de drenagem.

Ferreira et. al. (2007) utilizaram dados referentes a solos, relevo, vegetação, hidrografia e pluviosidade para a obtenção do mapa de uso e ocupação do solo e estimativa das características de escoamento superficial laminar e vazão máxima de escoamento superficial da bacia hidrográfica do Córrego João Pedro, localizado nos Municípios de Linhares e Sooretama, no Estado do Espírito Santo, através de técnicas de Geoprocessamento.

3.6.1 Fatores intervenientes no potencial de escoamento superficial e infiltração

Os principais fatores intervenientes no potencial de escoamento superficial e infiltração são: a precipitação, o tipo e a condição dos materiais terrestres, o uso e ocupação do terreno e a topografia.

Para estimar o escoamento superficial, é necessário determinar a precipitação efetiva da bacia. Este parâmetro consiste na soma de dois fluxos hídricos que penetram no dossel da floresta, devido ao gotejamento ou precipitação interna e o outro fluxo que escoar pelo tronco das árvores (Tucci, 2001).

Souza (1993) cita que os principais fatores que determinam a diferença entre a precipitação real e a efetiva, são:

- as características da área incluindo o seu uso atual e futuro, seja em relação à cobertura vegetal seja em relação à ocupação do terreno;
- o tipo de solo, especialmente no que diz respeito à infiltração;
- a condição de retenção superficial do terreno, notadamente no que concerne às depressões ou obstáculos, ao escoamento resultante do tipo de manejo agrícola, da existência de manto caducifólio ou de causas antrópicas;

- a condição de umidade antecedente ou de saturação do solo resultante das chuvas anteriores à ocorrência de tormentas.

Seguindo recomendações do U.S. (*Conservation Service*), Souza (1993) elaborou um quadro de valores usuais de curvas índice (n) (Quadro 3.4). O referido quadro permite identificar o número da curva índice aplicável em função dos fatores intervenientes no escoamento superficial, supracitados. Para o autor, o quadro também pode ser utilizado na determinação do coeficiente de escoamento (C), pois há relações entre esse parâmetro e o número da curva índice (n).

Quadro 3.4 - Valores usuais de Curvas Índice (n) (Souza, 1993).

VALORES USUAIS DE CURVAS ÍNDICE (n)						
Características da área	Tipo de solo	Condição de retenção superficial	Condição de umidade antecedente do solo			
			Baixa	Média	Elevada	Especial para chuvas antecedentes
Florestas e matas	Arenoso espesso, profundo e muito permeável	Forte	12	25	45	23
		Fraca	27	45	65	36
	Areno-siltoso ou arenoso menos espesso e pouco profundo	Forte	35	55	75	43
		Fraca	46	66	84	52
	Argiloso ou coloidal e pouco permeável	Forte	51	70	87	56
		Fraca	59	77	92	63
Pastos, Campos e Prados	Arenoso espesso, profundo e muito permeável	Forte	59	77	92	63
		Fraca	67	83	96	71
	Areno-siltoso ou arenoso menos espesso e pouco profundo	Forte	67	83	96	71
		Fraca	72	86	97	76
	Argiloso ou coloidal e pouco permeável	Forte	72	86	97	76
		Fraca	77	89	98	80
Terreno natural com pouca vegetação	Arenoso espesso, profundo e muito permeável	Forte	63	80	94	67
		Fraca	72	86	97	76
	Areno-siltoso ou arenoso menos espesso e pouco profundo	Forte	72	86	97	76
		Fraca	80	91	98	84
	Argiloso ou coloidal e pouco permeável	Forte	78	90	98	82
		Fraca	85	94	99	90
Terreno cultivado	Arenoso espesso, profundo e muito permeável	Forte	32	51	71	39
		Fraca	53	72	88	58
	Areno-siltoso ou arenoso menos espesso e pouco profundo	Forte	47	67	84	53
		Fraca	65	81	95	69
	Argiloso ou coloidal e pouco permeável	Forte	58	76	91	62
		Fraca	75	88	98	79
Áreas urbanizadas	Arenoso espesso, profundo e muito permeável	Forte	63	80	94	67
		Fraca	80	91	98	84
	Areno-siltoso ou arenoso menos espesso e pouco profundo	Forte	51	70	87	56
		Fraca	56	74	90	60
	Argiloso ou coloidal e pouco permeável	Forte	58	76	91	62
		Fraca	63	80	94	67

3.6.1.1 Precipitação

A distribuição da precipitação ao longo do ano, em uma bacia, consiste em um fator decisivo no volume de recarga da água subterrânea. Quando as chuvas são distribuídas regularmente ao longo do tempo, elas favorecem a infiltração; caso contrário, quando um grande volume de água precipita em um intervalo curto de tempo, o escoamento superficial é favorecido devido à redução da taxa de infiltração (KARMAN, 2001 e TUCCI, 2001).

Conforme Tucci (2001), em bacias pequenas ($<500\text{km}^2$), as precipitações convectivas de alta intensidade, pequena duração e distribuídas numa pequena área, podem provocar as grandes enchentes, enquanto que, para bacias maiores, as precipitações mais importantes passam a ser as frontais, que atingem grandes áreas com intensidade média.

3.6.1.2 Tipo e condição dos materiais terrestres

O substrato rochoso, o solo e as suas condições de saturação exercem influência no volume e na velocidade de infiltração do terreno, bem como no potencial de escoamento superficial.

Em geral, os solos e rochas mais permeáveis apresentam maior capacidade de infiltração, favorecem a rápida percolação para o lençol subterrâneo e reduzem o escoamento superficial direto (Jorge e Uehara, 1998). A infiltração é favorecida por materiais porosos e permeáveis (ex. solos e sedimentos arenosos), além de rochas expostas muito fraturadas ou porosas; já materiais muito argilosos e rochas cristalinas pouco fraturadas, (ex. corpos ígneos plutônicos e rochas metamórficas, como granitos e gnaisses) têm uma tendência desfavorável.

Espessas coberturas de material inconsolidado exercem um importante papel no controle de infiltração, retendo temporariamente parte da água que, posteriormente, é liberada lentamente para a rocha subjacente (KARMAN, 2001).

Uma característica do solo, importante no processo de infiltração, é a capacidade de campo, que consiste no volume de água que é absorvido pelo solo antes dele atingir a saturação e que não contribui com a recarga subterrânea, e é aproveitada apenas pela vegetação.

Para Tucci (2001), as condições iniciais de umidade do solo podem influenciar significativamente no escoamento resultante de precipitações de pequeno volume, de alta e média intensidade. O autor afirma que, quando o estado de umidade é baixo, uma boa parcela da precipitação é retida, o que ameniza as cheias.

Diferentes tipos de solo podem apresentar susceptibilidade diferenciada ao escoamento superficial, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo.

3.6.1.3 Uso e ocupação do terreno

O conhecimento dos padrões de ocupação territorial consiste em um pré-requisito indispensável para fins de caracterização da paisagem e, especialmente, para o dimensionamento e planejamento de medidas de preservação, conservação e recuperação ambiental (VALENTE e VETTORAZZI, 2003).

A cobertura do terreno exerce influência sobre a velocidade da infiltração da água no terreno e seu potencial de gerar escoamento superficial e detém o poder de causar tanto impactos positivos quanto negativos sobre o meio.

Lorandi e Cançado (2002) relatam que a falta de planejamento do uso e ocupação do solo urbano e rural desencadeiam uma série de problemas relacionados à urbanização, que, direta ou indiretamente, causam problemas ao gerenciamento das bacias hidrográficas. Pires e Santos (1995) esquematizaram uma cadeia de alterações advindas de atividades antrópicas que culminam em alterações sobre os recursos hídricos (Figura 3.6).

Atividades antrópicas, como o avanço da urbanização e a devastação da vegetação, podem levar a significativas alterações na quantidade de água que infiltra no subsolo e que escoam superficialmente no terreno.

Em bacias urbanas, a cobertura do terreno é alterada pelas construções e pela pavimentação, o que leva a uma impermeabilização do terreno e consequente redução das taxas de infiltração e ao aumento do escoamento superficial. Esse processo tem impacto potencial de elevação dos picos de cheias e redução da recarga de água subterrânea. Contudo, Karman (2001) cita que em grandes centros urbanos, pode haver recarga significativa da água subterrânea por vazamentos na rede de abastecimento.

Figura 3.6 - Possíveis interações provocadas nos recursos hídricos por atividades humanas (adaptado de Pires; Santos, 1995).

Ações antrópicas sobre a rede de drenagem podem, de um lado, reduzir picos de cheias pela regularização da vazão proporcionada por reservatórios, e de outro, provocar o aumento de picos pela canalização de corpos d'água (TUCCI, 2001).

Em bacias rurais, a infiltração pode sofrer redução pelo desmatamento, pela exposição de vertentes causada pela ausência de um manejo agrícola eficiente, e pela compactação dos solos, devido ao pisoteamento de animais em atividades de pecuária extensiva (KARMAN, 2001).

A cobertura vegetal tende a retardar o escoamento e aumentar a infiltração e as perdas de água por evapotranspiração, em função dos processos de interceptação e a aumentar a porosidade do solo exercido pelo sistema radicular das plantas.

A interceptação, além de retardar o escoamento superficial, leva a uma liberação mais lenta da água, por gotejamento, e ao aumento das taxas de evapotranspiração. Segundo Karman (2001), em ambientes florestados, aproximadamente 1/3 da precipitação

interceptada sofre evaporação antes de atingir o solo. O sistema radicular da vegetação abre caminhos no solo e, conseqüentemente, provoca o aumento da porosidade, favorecendo, assim, o aumento das taxas de infiltração.

Assim, o desmatamento pode ser considerado como um fator que induz alterações drásticas no equilíbrio do ciclo hidrológico. Inicialmente, leva ao aumento significativo do escoamento superficial e da infiltração e, posteriormente, pode levar a uma gradual redução da infiltração, com conseqüente aumento do escoamento superficial.

Albuquerque Filho (1995) afirma que a interferência da implantação de diferentes tipos de uso e ocupação sobre o meio pode induzir oscilações no nível freático. Tais alterações são induzidas pela redução da taxa de recarga natural, o que dificulta o acesso às águas subterrâneas e reduz a disponibilidade hídrica. Albuquerque Filho (op. cit.) cita exemplos de uma série de situações de oscilações induzidas e suas principais causas e efeitos sobre o meio físico.

Souza (1993) reproduziu uma versão modificada do quadro recomendado pela American Society of Civil Engineers – ASCE e pela Water Pollution Control Federation – WPCF com a determinação de coeficientes de escoamento de bacias em função do seu uso e ocupação (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 - Valores usuais do coeficiente de escoamento em função do uso e ocupação do solo (Souza, 1993).

VALORES USUAIS PARA O COEFICIENTE DE ESCOAMENTO					
Características da área	C		Características da área	C	
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
Pátios e estabelecimentos	0,90	0,95	Áreas periféricas não urbanizadas	0,10	0,30
Áreas cobertas	0,75	0,95	Parques e cemitérios	0,10	0,25
Vias concretadas	0,80	0,95	Terreno rochoso montanhoso	0,50	0,85
Vias asfaltadas	0,70	0,95	Terreno rochoso plano ou ondulado	0,35	0,65
Passeios	0,75	0,85	Relvado argiloso ondulado e montanhoso	0,25	0,35
Vias em calçada polidétrica	0,70	0,85	Relvado argiloso suavemente ondulado	0,18	0,22
Centros industriais pesados	0,60	0,90	Relvado argiloso plano	0,13	0,17
Centros industriais leves	0,50	0,80	Relvado arenoso ondulado e montanhoso	0,15	0,20
Áreas urbanas centrais	0,70	0,95	Relvado arenoso suavemente ondulado	0,10	0,15
Áreas urbanas periféricas	0,50	0,70	Relvado arenoso plano	0,05	0,10
Conjuntos habitacionais densos	0,60	0,75	Florestas e matas caducifólias	0,30	0,60
Conjuntos prediais	0,50	0,70	Florestas e matas coníferas	0,25	0,50
Conjuntos residenciais	0,40	0,60	Campos, prados e cerrados	0,35	0,65
Residências uni-familiares	0,35	0,50	Pomares e chácaras	0,15	0,40
Lotes urbanos grandes	0,30	0,45	Encostas com culturas permanentes	0,15	0,40
Play grounds	0,20	0,35	Vales com culturas permanentes	0,10	0,30

O relevo de uma bacia hidrográfica tem grande influência sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos. A velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno; já a temperatura, a precipitação, a evaporação etc. são influenciadas pela altitude da bacia (VILELA E MATTOS, 1975).

Para Jorge e Uehara (1995), o relevo de uma bacia hidrográfica e, principalmente, a declividade, exerce grande influência sobre a velocidade do escoamento superficial, o que afeta o tempo que a água da chuva leva para concentrar-se nos leitos fluviais.

Tucci (2001) cita a densidade de drenagem, a declividade do rio ou da bacia, a capacidade de armazenamento e a forma das bacias como atributos do relevo intervenientes no escoamento superficial e na infiltração de água no solo.

3.6.1.4 Topografia

Elevadas declividades, favorecem o escoamento superficial direto, diminuindo a infiltração, ao passo que superfícies suavemente onduladas favorecem um escoamento superficial mais lento e permitem a infiltração da água no terreno (KARMAN, 2001).

Geralmente, cabeceiras de bacias apresentam uma boa drenagem e grande declividade; essas características levam a um hidrograma íngreme (pico de cheia elevado – alto escoamento superficial) com pouco escoamento de base (baixa infiltração). Já as bacias com grande área de inundação tendem a amortecer o escoamento e a regularizar o fluxo.

Bacias com formato circular concentram o escoamento de forma a antecipar e aumentar o pico de cheia quando comparada a uma bacia de formato alongado, que tem o escoamento predominantemente no canal principal, amortecendo as vazões.

O relevo consiste em um importante atributo a ser considerado em avaliações do potencial de infiltração e escoamento superficial de uma região. Atributos morfológicos, morfométricos e geomorfométricos de bacias merecem destaque como relevantes parâmetros no âmbito da identificação e discretização de regiões hidrologicamente homogêneas.

3.7 Morfometria e comportamento hidrológico de bacias hidrográficas

As características físicas de uma bacia são de suma importância no seu comportamento hidrológico. A morfometria das bacias de drenagem é apontada por inúmeros autores como forte controladora das características hidrológicas e do escoamento superficial.

Atributos do meio físico constituem na mais conveniente possibilidade de compreensão da variação espacial dos componentes do regime hidrológico (VILLELA e MATTOS, 1975). Os autores justificam essa afirmação pela estreita relação entre o processo e os atributos em questão.

A partir da publicação de Horton (1945), a análise de bacias hidrográficas começou a apresentar um caráter mais objetivo, por meio de análises quantitativas de geometria das bacias de drenagem (morfometria) e pela hierarquização da rede de drenagem.

Patton (1988) cita que, entre as décadas de 1930 e 1980, parâmetros morfométricos como área e forma da bacia, hipsometria da bacia, comprimento e declividade do canal principal, têm sido associados por diversos autores como fatores importantes no controle de parâmetros da unidade hidrográfica e, portanto, no comportamento de hidrógrafas (tempos de duração de picos de cheias) de enchentes/inundações.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas consiste em um processo sistemático e racional que se preocupa em “medir formas de relevo” (Horton, 1945). Para Christofletti (1980), essa análise tem início com o estabelecimento da hierarquia fluvial e, em seguida, processam-se as seguintes análises:

- linear, que engloba: relação de bifurcação, relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem, relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação, comprimento do rio principal, extensão do percurso superficial, relação do equivalente vetorial, gradiente de canais;
- areal, a qual abrange: área da bacia, comprimento da bacia, relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia, forma da bacia, densidade de

rios, densidade da drenagem, densidade de segmentos da bacia, relação entre áreas das bacias, coeficiente de manutenção;

- hipsométrica, que envolve: curva hipsométrica, coeficiente de massividade e coeficiente orográfico, amplitude altimétrica máxima da bacia, relação de relevo, índice de rugosidade.

Morisawa (1962), desenvolveu um índice que demonstra a influência em processos de inundação, o fator topográfico. Essa componente consiste no produto da densidade hidrográfica (Dh) da relação de relevo (Rr) e do índice de circularidade (Ic), conforme mostrado na expressão a seguir:

$$Ft = Dh.Ic.Rr$$

Equação 3.6

Souza (2006), buscando estudar a suscetibilidade a inundações de uma bacia do litoral paulista, criou um índice denominado Índice de suscetibilidade morfométrica (SM) e o aplicou na construção de uma Carta de suscetibilidade morfométrica das bacias às inundações em regiões costeiras.

O índice criado por Souza (2006) integrou diversos parâmetros morfométricos por meio de uma análise multivariada. Os parâmetros morfométricos considerados foram: Ordem Hierárquica (O), Forma da bacia (Fg), Fator Forma (Kf), Comprimento do Canal Principal (L), Área da bacia (AT), Área da bacia na Encosta (AEnc), Área da bacia na Planície Costeira (APC), Perímetro da bacia (P), Frequência de Canais Totais na Encosta (FcEnc) e na Planície Costeira (FcPC), Frequência de Canais de 1ª Ordem (Fc1), Declividade média do Canal Principal (S), Densidade Hidrográfica Total (DhT), na Encosta (DhEnc) e na Planície Costeira (DhPC) e Densidade de Confluências Total (DcT), na Encosta (DcEnc) e na Planície Costeira (DcPC).

O índice SM é dado como:

$$SM = f \left(O, Fg, Kf, AT, AEnc, APC, P, L, FcEnc, FcPC, Fc1, DhT, DhEnc, DhPC, DcT, DcEnc, DcPC, \frac{1}{S} \right)$$

Equação 3.7

São vários os estudos que apontam relações entre parâmetros morfométricos e o regime de escoamento nas bacias. Dentre as referidas publicações, pode-se citar: Horton

(1945), Smith (1950 apud França, 1968), Straler (1952), Freitas (1952 apud Gandolfi, 1971), Müller (1953), Schumm (1956), Melton (1957 apud Zăvoianu, 1985), Chorley, Malm e Pogorzelski (1957), Strahler (1960), Hack (1957 apud Morisawa, 1962), Morisawa (1962), França (1967 apud Christofolletti, 1969), Schumm (1977 apud Ferreira, 1996), França (1968), Gandolfi (1968), Christofolletti (1969), Christofolletti (1970), Gregory e Walling (1973 apud Ferreira, 1996), Christofolletti (1974), Patton e Baker (1976), Villela e Mattos (1975), Patton e Baker (1976), Christofolletti (1979), Christofolletti (1980), Tavares e Queiroz (1981), Zăvoianu (1985), Patton (1988), Jorge e Uehara (1995), Souza (2006) e Oliveira, Guasselli e Saldanha (2010), Oliveira, Laurino e Saldanha (2010), Collares (2000), Brollo (2001), Brubacher, Oliveira e Guasselli (2011).

Os Quadros 3.6 e 3.7 mostram uma síntese de relações entre parâmetros morfométricos e padrões hidrológicos observados nas referências supracitadas.

O Quadro 3.6 apresenta as variáveis morfométricas consideradas, neste estudo, como principais parâmetros indicativos do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Quadro 3.6 - Influência de parâmetros morfométricos no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Variável morfométrica	Influência hidrológica	
Desvio padrão da altitude	Indica a velocidade de escoamento superficial	Quanto maiores as variações altimétricas, maior a velocidade de escoamento
Relação de relevo	Indica a velocidade de escoamento superficial	Quanto maior a relação de relevo, maior a velocidade de escoamento superficial
Índice de rugosidade	Indica a velocidade de escoamento superficial	Quanto maior o índice de rugosidade, maior a velocidade de escoamento
Relação de bifurcação	Indica a permeabilidade dos materiais terrestres	Quanto maior a R_b , maior o escoamento superficial
Densidade hidrográfica	Indica a permeabilidade dos materiais terrestres	Quanto maior a D_h , maior o volume e a velocidade de escoamento
Densidade de drenagem	Indica a permeabilidade dos materiais terrestres	Quanto maior a D_d , maior o volume e a velocidade de escoamento
Coefficiente de manutenção	Indica a permeabilidade dos materiais terrestres	Quanto menor o C_m , maior o volume e a velocidade de escoamento
Textura topográfica	Indica a permeabilidade dos materiais terrestres	Quanto menor a T_t , maior o volume e a velocidade de escoamento
Forma	Indica o tempo de concentração das águas pluviais	Bacias mais circulares têm um tempo de concentração menor e maiores picos de cheia
Sinuosidade	Indica a velocidade de escoamento nos canais e a sua capacidade de regularização	Quanto maior o índice, menor a velocidade de escoamento e maior a capacidade de regularização
Área	Indica o volume de descarga e a capacidade de regularização dos cursos d'água	Quanto maior a área, maior o volume de descarga e a capacidade de regularização

Quadro 3.7 - Variáveis direta e inversamente proporcionais ao tempo de concentração e a capacidade de regularização de vazões de bacias hidrográficas.

	Variáveis diretamente proporcionais	Variáveis inversamente proporcionais
Tempo de concentração Regularização de vazão	Permeabilidade dos materiais terrestres	Velocidade de escoamento superficial
	Sinuosidade Área Coeficiente de manutenção Textura topográfica	Índice de circularidade (Ic) Densidade hidrográfica Densidade de drenagem Relação de relevo Índice de rugosidade Variação altimétrica Relação de bifurcação

No Quadro 3.7 são relacionados os parâmetros morfométricos considerados direta e inversamente proporcionais ao tempo de concentração de águas pluviais nas bacias e o potencial de regularização de vazões.

Diante do exposto, conclui-se que, em casos de carência de dados hidrométricos, a avaliação de parâmetros morfométricos, através da observação direta do meio físico, consiste na mais lógica forma de análise para a identificação e diferenciação de tipologias hidrológicas.

3.8 Estimativa de Potencialidades de demanda hídrica

A Lei nº 9.433/1997, no seu artigo 3º, define a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, como uma das diretrizes para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Rodrigues e Mendiando (2011) discutem que, conforme objetivos e dados disponíveis, o balanço hídrico pode ser efetuado em vários níveis de detalhamento e unidades de cálculo. Para fins de planejamento territorial de bacias hidrográficas, o balanço hídrico deve avaliar as demandas produzidas pela antropização e/ou por alterações de padrões de ocupação territorial.

A avaliação de demandas hídricas pode ser realizada em diversas escalas, e diferentes abordagens. Nota-se que, de um modo geral, nos planos de bacias hidrográficas brasileiros a demanda hídrica é calculada tomando-se por base o cadastro de captações superficiais e subterrâneas.

Hoekstra (2003) introduziu conceitos de pegada hídrica ou “WF” (*Water Footprint*).

Hoekstra et al. (2011) define a pegada hídrica como:

“um indicador do uso da água associado ao seu uso direto e indireto feito por um consumidor ou produtor. A pegada hídrica de um indivíduo, comunidade ou negócio é definida como o volume total de água usada para produzir os bens e serviços consumidos por este indivíduo ou comunidade ou produzido pelas empresas. O uso da água é medido em termos dos volumes de água consumidos (evaporado ou incorporado no produto) e/ou poluído por unidade de tempo. Uma pegada hídrica pode ser calculada para um produto particular, para qualquer grupo bem definido de consumidores (por exemplo, um indivíduo, família, vila, cidade, estado ou país) ou produtores (por exemplo, uma organização pública, empresa privada ou setor econômico). A pegada hídrica é um indicador geográfico explícito, mostrando não somente os volumes de água usados e a poluição, mas também sua localização”

De forma simplificada a pegada hídrica pode ser definida como um indicador multidimensional de compreensão dos impactos nos recursos hídricos, que apresenta consumos e implicações por fonte e tipo de poluição específica. A pegada hídrica é composta por componentes de consumo e de poluição: a WF azul, a WF verde e a WF cinza. Onde:

- a WF verde é a parcela da precipitação, retida no solo, que é consumida durante o processo de crescimento da vegetação e é capaz de ser definida através de estimativas de evapotranspiração;
- a WF azul consiste no volume de água consumida pela produção de um bem ou serviço também definida como a quantidade de água captada de uma fonte superficial ou subterrânea que não retorna para bacia da qual ela foi retirada; e
- a WF cinza é o volume de água necessário para diluir os poluentes em que o nível de qualidade da água permaneça acima dos padrões definidos.

A Geolock (2013) afirma que a quantificação da pegada hídrica viabiliza a avaliação da demanda local do recurso e a verificação de impactos qualitativos e quantitativos associados a cada tipo de produção. Além disso, o autor mostra que, por meio dessa avaliação, podem-se identificar aspectos como reuso, origem e destino das águas e implementar melhorias na cadeia produtiva, como redução de riscos e custos, auxílio na tomada de

decisões, aumento do conhecimento de fornecedores e consumidores a respeito da sustentabilidade à produção de um determinado produto.

Para Rodrigues e Mendiando (2012), a proposta introduzida por Hoekstra é uma eficiente forma de avaliação de demandas hídricas potenciais voltada à gestão de recursos hídricos e que pode contribuir para a prática da hidrossolidariedade.

A Figura 3.7 mostra a inserção dos fluxos de pegada hídrica verde, azul e cinza no contexto do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

Figura 3.7 - Fluxos de água verde, azul e cinza no balanço hídrico de bacias hidrográficas (adaptado de RODRIGUES E MENDIONDO, 2013).

Para Chartres e Varma (2011), a água azul é proveniente de aquíferos, lagos, rios e reservatórios, enquanto a água verde consiste na água contida na zona insaturada do solo e disponível para ser utilizada pelas plantas.

Conejo (2005) efetuou um balanço hídrico simplificado das bacias hidrográficas brasileiras (Figura 3.8). Para a bacia do Paraná, o autor observou que, em média, 73% da precipitação retorna à atmosfera na forma de vapor. Já para o Brasil, esse valor é de cerca de 63%.

Rodrigues e Mendiando citam que, de um modo geral, 65% da precipitação formam a água verde, que retorna à atmosfera na forma de vapor e 35% correspondem à água azul, que sai do sistema através do escoamento de rios e aquíferos.

Figura 3.8 - Balanço Hídrico das bacias hidrográficas brasileiras (Conejo, 2005).

A demanda azul corresponde à vazão captada destinada a atender os diversos usos consuntivos. Entretanto, nem toda a vazão captada é consumida, Conejo (2005) destaca a importância de estimar o volume de água que é efetivamente consumido durante seu uso. Nesse contexto, pode-se dividir a vazão captada nas componentes: vazão de retorno e vazão de consumo.

IGAM (2010) GAMA (2009) INE (2011) EMBRAPA (2005) CETCAF (2013) CETCAF (2013) Tabosa (2003) TELLES (2002) FBB, MMA e FUNABRE (2011) citam relações entre atividades agropecuárias e industriais, a retirada e consumo de recursos hídricos.

A FBB, O MMA e a fundação FUNARBE (2011), visando subsidiar a elaboração de um modelo de equilíbrio dinâmico, desenvolveram uma matriz de coeficientes técnicos de vazões de retirada, consumo e retorno relacionados a atividades industriais e agricultura irrigada.

A ONS (2003) determina alguns coeficientes de retorno médios para os principais usos consuntivos da água (Quadro 3.8).

As aplicações do conceito da pegada hídrica têm crescido rapidamente. Hoekstra (2011) organizou uma tabela que demonstra, segundo categorias (estudos globais, nacionais, regionais, de bacias hidrográficas, de produtos gerais e de empresas), estudos que lançaram mão dos conceitos de pegada hídrica até o ano de 2011 (Quadro 3.9). O autor observou que, na maioria dos estudos que vêm sendo realizados, o foco é sobre a contabilização da pegada

hídrica e que o desafio agora é a abordagem das fases de avaliação de sustentabilidade e a formulação de respostas/ações.

Quadro 3.8 - Coeficientes de retorno médios da vazão captada em função dos principais tipos de uso consuntivo da água.

Uso	Coeficiente de retorno
Abastecimento público	0,8
Abastecimento rural	0,5
Abastecimento industrial	0,8
Irrigação	0,2
Criação de animais	0,2

Quadro 3.9 - Estudos de pegada hídrica (Hoekstra, 2011).

Estudos globais e supranacionais sobre o comércio de água virtual e a pegada hídrica	<ul style="list-style-type: none"> • Global: Hoekstra e Hung (2002, 2005); Hoekstra (2003, 2006, 2008b); Chapagain e Hoekstra (2004, 2008); Liu et al (2009); Siebert e Döhl (2010) • Ásia Central: Aldaya et al (2010c)
Estudos sub-nacionais sobre a pegada hídrica e o comércio de água virtual	<ul style="list-style-type: none"> • China (Ma et al., 2006; Liu e Savenije, 2008; Hubacek et al, 2009; Zhao et al, 2009) • Alemanha (Sonnenberg et al, 2009) • Índia (Kumar e Jain, 2007; Kampman et al, 2008, Verma et al, 2009) • Indonésia (Bulsink et al, 2010) • Marrocos (Hoekstra e Chapagain, 2007b) • Holanda (Hoekstra e Chapagain, 2007b; Van Oel et al, 2008, 2009) • Romênia (Ene e Teodosiu, 2009) • Espanha (Novo et al, 2009; Aldaya et al, 2010b; Garrido et al, 2010) • Tunísia (Chahed et al, 2008) • Reino Unido (Chapagain e Orr, 2008; Yu et al, 2010)
Estudos sub-nacionais sobre a pegada hídrica e o comércio de água virtual	<ul style="list-style-type: none"> • Províncias chinesas (Ma et al, 2006) • Cidade de Pequim (Wang e Wang, 2009) • Estados indianos (Kampman et al, 2008) • Região da Mancha Ocidental, Espanha (Aldaya et al, 2010d) • Andaluzia, Espanha (Dietzenbacher e Velazquez, 2007) • West Bank, Palestina (Nazer et al, 2008) • Bacia do Rio Guadiana, Espanha (Aldaya e Llamas, 2008) • Baixo Vale de Fraser e bacia do Rio Okanagan, Canadá (Brown et al, 2009) • Bacia do Rio Nilo, África (Zeitoun et al, 2010)

Gama (2009) realizou um estudo dos principais usuários e tipos de uso de recursos hídricos na bacia do Rio das Velhas. Além disso, o autor efetuou, segundo diferentes cenários propostos, estimativas de consumo e cobrança, pelo uso dos recursos hídricos.

Hoekstra et al. (2002) mostram um exemplo de balanço comparativo entre a disponibilidade e a pegada hídrica (Figura 3.9) ao longo do ano.

Hoekstra (2011) realizou um estudo global para todos os países e avaliou em específico a pegada hídrica na Europa. Nesse estudo, Hoekstra estabelece cenários para a

pegada hídrica para 2050. Os cenários foram construídos a partir de atributos de mudança, tais como: crescimento da população, crescimento econômico, produção/comércio padrão, padrão de consumo (mudança na dieta, uso de bioenergia) e desenvolvimento tecnológico.

Figura 3.9 - Pegada hídrica azul durante um ano comparando com a disponibilidade de água azul, sendo que a última é igual à vazão (em condições originais) menos as demandas de vazão ambiental.

Zeng et al (2012) quantificaram a pegada hídrica na bacia do rio Heihe (região do nordeste árido e semi-árido da China). Os autores citaram que, apesar de haver muitos trabalhos relacionados à quantificação de WF, ainda existem poucos estudos focando sobre bacias hidrográficas específicas, principalmente em regiões áridas e semi-áridas.

3.9 Extremos hidrológicos: excedentes e deficiências hídricas

“Em determinadas ocasiões, a natureza parece trabalhar em excesso, quando provoca chuvas torrenciais que ultrapassam a capacidade dos cursos d’água, provocando inundações. Em outras ocasiões, parece que o mecanismo do ciclo hidrológico parou completamente e com ele a precipitação e o escoamento superficial.” (Vilela e Matos, 1975).

Por milênios as pessoas têm tentado proteger as áreas habitadas de inundações e fornecer água para áreas onde não há disponibilidade hídrica suficiente (METHODS, 2003). Há evidências de que a primeira estrutura hidráulica maior foi uma barragem de alvenaria localizada no rio Nilo, a aproximadamente 23km ao Sul do atual Cairo, Egito, que foi construída

há aproximadamente 4000 A.C.. O aumento do nível a montante dessa estrutura permitiu o desvio dos fluxos subterrâneos para irrigar terras áridas próximas ao rio Nilo.

Há uma má distribuição dos recursos hídricos no espaço e no tempo. “Muitas vezes várias regiões são acometidas por grandes enchentes e, em outra época do ano, há períodos de seca” (Hirata, 2001). A Suécia e Botswana são citadas por Hirata como exemplos em que se nota esse tipo de comportamento. Ambas as regiões apresentam as mesmas taxas de precipitação total anual; contudo, em função de desigualdades nas taxas de evapotranspiração e da distribuição das chuvas, a Suécia apresenta um clima úmido; e Botswana, semi-árido.

Assim, o tempo de permanência da água na superfície terrestre limita sua disponibilidade.

3.9.1 Disponibilidade hídrica

Em 1972, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente em Estocolmo já prenunciava uma crise mundial da água. Na década de 1990, o Comitê de Recursos Naturais das Nações Unidas confirmou que 80 países, que representavam 40% da população mundial, padeciam de grave carência de água e que, em muitos casos, essa falta era um fator limitante para o desenvolvimento econômico e social.

A problemática da falta de água em condições satisfatórias tanto de quantidade quanto de qualidade é considerada um dos maiores desafios do século XXI. Hoje, a disputa pelo uso da água pode ser notada em inúmeras partes do mundo e chega a atingir proporções alarmantes.

No Brasil, correm 53% da água doce da América do Sul e 12% da vazão total mundial dos rios (Hirata, 2001). Dessa forma, quando se fala em disponibilidade hídrica, este país está em uma situação privilegiada, que é o resultado da sua extensão territorial, e de seu regime climático.

Contudo, a variação geográfica e temporal dessa disponibilidade de água tem gerado conflitos pelo seu uso em diversas bacias (Moreira, 2006 apud Moreira et al., 2007). Várias regiões já apresentam problemas com relação à falta de recursos hídricos, gerando conflitos entre os diversos setores usuários, o que demanda medidas de planejamento e gestão que

minimizem os conflitos entre os usos múltiplos deste bem comum, para evitar assim, maior escassez no futuro.

Nesse contexto, uma relevante questão é a gestão dos recursos ambientais na busca do desenvolvimento sustentável, que objetiva averiguar a oferta natural de água e controlar o uso dos recursos hídricos. O gerenciamento dos recursos hídricos é um dos maiores desafios da atualidade e consiste em fornecer quantidades suficientes de água com qualidade adequada, no momento correto, para atender os usos múltiplos. Montanõ e Souza (2005) propõem a inclusão da avaliação da disponibilidade de recursos hídricos, em termos qualitativos, num processo de planejamento territorial.

A Lei federal 9433/1997 fundamenta que a água constitui um recurso natural limitado e dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; e que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. E, como instrumentos dessa política, estabelece a outorga e cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

Assim, a outorga de direito de uso da água é o instrumento legal que assegura ao usuário o direito de utilizar os recursos hídricos e garante o controle quantitativo e qualitativo do uso da água, especificando o local, a fonte, a vazão e a finalidade de seu uso em determinado período.

Para fins de deliberações referentes aos recursos hídricos em Minas Gerais, o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) determina, por meio da Portaria IGAM 30/93, que as captações em um corpo hídrico superficial não devem ser superiores a 30% da vazão mínima que tem duração de sete dias e recorrência de dez anos (Q7,10). Esse parâmetro pode ser utilizado para fins de referência na concessão de outorgas e/ou para mediação de conflitos entre os múltiplos tipos de uso da água.

Para fins de estudos hidrológicos regionais, o estudo realizado por Souza (1993), denominado “Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais”, é usado como referência em Minas Gerais. O estudo em questão envolve um levantamento histórico dos dados disponibilizados por estações hidrométricas do estado, bem como a proposição de uma metodologia para o uso dessas informações para a obtenção de parâmetros hidrológicos que

possam ser utilizados como referência para as decisões e deliberações referentes ao uso dos recursos hídricos.

3.9.1 Estudos relacionados à disponibilidade hídrica

Azambuja (2000) realizou um balanço hídrico para determinar a quantidade de água disponível na bacia do rio Piracicaba, relacionando as diferentes demandas encontradas. Nesse trabalho, foi utilizado um modelo ModsimP32, que permite definir estratégias de planejamento na área de recursos hídricos.

Moreira et al. (2007) desenvolveram um sistema que permite obter a disponibilidade hídrica para qualquer seção de interesse ao longo da rede hidrográfica de uma bacia e quantificar o impacto da concessão de uma nova outorga nesta disponibilidade, o qual foi denominado Sistema Integrado para Gestão de Recursos Hídricos (SINGERH).

Silva (2005) realizou uma análise sobre a aplicação de modelos de probabilidade de séries históricas de vazões mínimas diárias anuais e mínimas anuais das médias de 7 dias consecutivos, para 7 estações fluviométricas e desenvolveu modelos matemáticos para regionalização dessas vazões na região, considerando características morfométricas e climáticas das bacias de drenagem monitoradas e ainda avaliou a disponibilidade hídrica para agricultura irrigada da região. As variáveis morfométricas, quantificadas nesse estudo, foram: área, densidade de drenagem, comprimento do curso d'água principal.

Magalhães (2010) realizou uma análise da dinâmica hídrica do córrego Atalaia. Nesse estudo o autor lançou mão de ferramentas de SIG associado a modelos hidrológicos. Para tanto, foi realizado um mapeamento de uso e ocupação do solo e a modelagem do relevo e da hidrografia, de onde foram extraídas variáveis morfométricas da bacia. Para estimar a $Q_{7,10}$, foi realizado um ajuste de modelos de regressão, em que a vazão é dada em função da área de drenagem.

Baena (2004) realizou a regionalização de vazões máxima, mínima, média de longo período e da curva de permanência da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, com base em um MDEHC (modelo digital do terreno hidrologicamente consistente). Nesse estudo, foram identificadas quatro regiões hidrologicamente homogêneas e obtidas equações de regressão

em que a área de drenagem e o comprimento do talvegue se caracterizam como as variáveis mais expressivas para a representação das diversas variáveis e funções regionalizadas.

No estudo supracitado, a metodologia utilizada na regionalização de vazões foi a da Eletrobrás (1985), em que para a identificação de regiões homogêneas podem ser utilizados os seguintes critérios:

- Critério baseado na análise da distribuição de frequência das vazões adimensionalizadas de cada estação: baseia-se no princípio de que as distribuições de frequência das vazões médias, máximas e mínimas das estações, localizadas em uma região hidrologicamente homogênea, seguem uma mesma tendência, sendo as diferenças proporcionais à média das séries de vazões consideradas. Essa característica permite que, ao se obterem séries transformadas de vazões, por meio da divisão dos seus valores pelas respectivas médias, as distribuições de frequência dessas séries transformadas sejam idênticas.
- Critério estatístico baseado na análise do ajuste de modelo de regressão múltipla: estabelecem-se regressões múltiplas entre as séries de vazões (média, máxima e mínima) e as diferentes características físicas e climáticas das bacias. As regiões hidrologicamente homogêneas são definidas em função da distribuição geográfica das estações e da combinação de estações que apresenta o melhor ajuste, avaliado por intermédio do teste estatístico da função F, do coeficiente de determinação ajustado, do desvio-padrão dos erros do ajustamento e dos erros percentuais (%dr) entre os valores das vazões observadas e estimadas pelos modelos de regressão obtidos para cada uma das regiões homogêneas.

Macedo (2005) propôs uma metodologia para a análise da relação entre cenários futuros de disponibilidade hídrica superficial e demanda, levando-se em consideração a evolução de fatores intervenientes na oferta hídrica superficial e na demanda hídrica, segundo a narrativa de cenários tendenciais de propagação dos padrões históricos de evolução destes fatores e a narrativa de cenários alternativos.

Macedo (op. cit.) aplicou sua proposta na região do Tietê-Jacaré e estimou disponibilidade hídrica superficial por meio do software HEC-HMS 2.1 que realiza a modelagem e a simulação de processos de chuva-vazão. Para estimar a demanda hídrica, Macedo desenvolveu um Modelo de Demanda Setorial por Recursos Hídricos (MDSA) baseado no modelo NoWUM (*Nordeste Water Use Model*).

Oliveira (2008) sugeriu critérios para a identificação de estações fluviométricas inconsistentes e propôs procedimentos de análise de propagação do efeito de reservatórios em estudos de regionalização de vazões na bacia do Rio Grande.

Novaes (2005) desenvolveu um modelo buscando estimar as vazões mínimas no rio Paracatu e seus afluentes, a partir de dados pluviométricos; comparar as vazões mínima e média de longa duração estimadas, por diferentes métodos de regionalização de vazões, e desenvolver um procedimento de ajuste das vazões média e mínima ao longo da bacia hidrográfica.

Rodrigues (2004) propôs uma metodologia para a realização de estimativas de demandas e disponibilidades hídricas. Nesse trabalho, o autor analisou o comportamento hidrológico da bacia do Paracatu entre 1970 e 2000 e estimou vazões de retirada e consumo pela irrigação, por abastecimentos animal e humano (urbano e rural); além disso, avaliou o impacto dos usos consultivos de água nas vazões do rio Paracatu e seus afluentes.

Almeida (2007) avaliou a influência do desmatamento na dinâmica hidrológica da bacia do Córrego do Galo. Para tanto, o autor realizou a modelagem morfométrica da bacia, elaborou mapas de remanescentes florestais e correlacionou registros de vazão e precipitação da bacia, além de realizar uma análise estatística de séries temporais de vazão.

Barbosa (2005) gerou modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para uma bacia em Minas Gerais. Para tanto, foram construídas séries de chuvas totais anuais, totais do semestre chuvoso e máximas diárias, e as séries de vazões máximas, médias e mínimas. Dados históricos foram extrapolados por meio de modelos de probabilidade e a influência do relevo sobre as variáveis hidrológicas foi quantificada.

Marques e Daniel (2000) compararam a disponibilidade hídrica e as demandas potenciais de diferentes aptidões agrícolas e chegaram a classes de potenciais de conflito por

escassez de água nas sub-bacias analisadas. Na avaliação das disponibilidades hídricas superficiais foram elaboradas curvas de permanência e séries de vazão dos canais de drenagem a partir da correlação de dados de chuva (modelados por meio de uma cadeia de Markov de primeira ordem) e séries de vazão observadas.

As cadeias de Markov consistem em um caso particular de processo de tempo discreto e variáveis discretas. Marques e Daniel (op. cit.) concluíram que a cadeia de Markov de primeira ordem, empregada na modelagem das séries de chuva, produziu bons resultados ao confirmar o comportamento concentrado da chuva na região do semi-árido brasileiro.

3.9.2 *Inundação*

Os canais fluviais apresentam cheias anuais associadas ao regime climático na bacia hidrográfica. Nesses episódios de excedente hídrico o volume de água que chega simultaneamente ao rio pode ser superior a sua capacidade de drenagem, o que pode levar às inundações de áreas ribeirinhas (TUCCI, 2001).

A inundação é um dos principais e mais destrutivos acidentes hidrológicos e ocorre quando a descarga do rio torna-se elevada e excede a capacidade do canal, extravasando suas margens e alagando planícies adjacentes. Esses episódios podem ser controlados por fatores naturais ou antrópicos (RICCOMINI, 2001). Para Tucci (2001), os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com que ocorrem as inundações.

Historicamente, as populações concentram-se às margens dos rios e invariavelmente, estão sujeitas às inundações. Os prejuízos anuais acumulados pelas inundações atingem cifras astronômicas (RICCOMINI, 2001 e TUCCI, 2001). Tucci (2001) cita que, em função da dificuldade de meios de transporte no passado, o rio era utilizado como a via principal e, dessa forma, cidades se desenvolveram às margens dos rios ou no litoral.

Conforme Amaral e Ribeiro (2009), em condições normais, as planícies e fundos de vales estreitos apresentam lento escoamento superficial das águas das chuvas e, nas áreas urbanas, esses fenômenos têm sido intensificados por alterações antrópicas, como a impermeabilização do solo, retificação e assoreamento de cursos d'água.

Dessa maneira, atualmente, podem-se verificar inúmeras cidades com áreas de alto risco às inundações, que levam a expressivos prejuízos sociais e econômicos. Apesar de tais prejuízos, muitas regiões ainda hoje sofrem considerável pressão para serem ocupadas.

Problemas relacionados às inundações e enchentes devem ser avaliados em estudos geoambientais. De acordo com Amaral e Ribeiro (2009), esses processos são derivados de fenômenos ou perigos naturais de caráter hidrometeorológico e/ou hidrológico.

“A ocupação das áreas urbanas impróprias pode ser evitada através do planejamento do uso dos solos das várzeas, o qual deve ser regulado no Plano Diretor Urbano das cidades” (TUCCI, 2001). Costuma-se dizer que as “enchentes são atos de Deus”, entretanto os seus efeitos são passíveis de gerenciamento por parte dos homens.

Conforme Infanti e Fornasari Filho (1998), os governantes e os técnicos têm a obrigação de evitar que a população sofra os impactos das cheias. Para tanto, fazem-se necessárias:

- obras de proteção contra cheias e
- ocupação adequada de áreas de risco, segundo uma abordagem da Geologia de Engenharia.

Apesar de a inundação ser um fenômeno cíclico e natural, testemunho do ambiente que nos envolve, pode ter acréscimos no seu potencial de ocorrência em função de ações antrópicas. Isso justifica a busca pela minimização de suas consequências através, sobretudo, da regulação da ocupação territorial.

Segundo Tavares e Silva (2008), o modelo de urbanização com a ocupação das planícies de inundação e impermeabilizações ao longo das vertentes afronta a natureza e, mesmo em cidades de topografia relativamente plana, onde teoricamente a infiltração seria favorecida, os resultados são catastróficos.

A alternativa mais racional para minimizar o efeito das enchentes é, sem dúvida, o adequado planejamento da ocupação territorial, particularmente das áreas inundáveis, através da identificação de áreas de risco e do estabelecimento de regras específicas para seu uso (RICOCMINI, 2001).

Logo, a regulamentação do uso das zonas de inundação deve seguir mapas com demarcação de áreas de diferentes riscos e critérios de ocupação. Nesse contexto, o zoneamento pode definir um conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação, buscando a redução futura das perdas socioeconômicas decorrentes de grandes cheias.

3.9.3 *Estudos relacionados à Inundação*

Souza (2005) apresentou um método de correlação de um conjunto de dezoito parâmetros morfométricos de bacias de drenagem do Litoral Norte de São Paulo, baseado no estabelecimento da “susceptibilidade morfométrica” dessas bacias ao desenvolvimento de inundações. Tal método permite a identificação de bacias homogêneas sob o ponto de vista morfométrico e, conseqüentemente, hidrológico. Assim, o autor conclui que tal índice poderia ser utilizado em métodos de identificação de bacias hidrologicamente homogêneas e regionalização de cheias, para bacias onde não há dados hidrológicos disponíveis.

Em 2006, Souza baseado no índice de susceptibilidade morfométrica (SM), elaborou uma Carta susceptibilidade morfométrica às inundações, enchentes e alagamentos para o Litoral Norte de São Paulo (municípios de São Sebastião, Ilhabela, Caraguatatuba e Ubatuba).

Lima (2010) realizou o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação da bacia hidrográfica do Arroio do Salso, localizada na zona sul de Porto Alegre, a qual tem um conhecido histórico de inundações. Para tal pesquisa, foi utilizada uma metodologia geográfica, buscando reconhecer os condicionantes à ocorrência de processos de inundação. A avaliação ambiental englobou múltiplos fatores (naturais e antrópicos) e deu ênfase aos aspectos geomorfológicos.

Bhatt et al. (2009) discutem sobre a utilização do sensoriamento remoto para mapeamento de inundações em tempo real, no monitoramento de cheias no rio Kosi na Índia e no Nepal. Conforme Moel et al. (2009), com o advento das imagens de sensoriamento remoto, as extensões de inundação (recentes) podem ser determinadas facilmente e com precisão, o que abre possibilidade para calibrar ou validar extensões de inundação simuladas por modelos computacionais.

Segundo Büchele et al. (2006), a avaliação do risco de inundações pode ser feita usando métodos de complexidade variável, dependendo da quantidade de dados e dos recursos disponíveis. Moel et al. (2009) resumem na Figura 3.10 a forma geral da estrutura conceitual de avaliações de riscos de inundações.

Figura 3.10 - Quadro conceitual para avaliação de perigo de inundações. As curvas exibidas são somente ilustrativas, baseadas em um caso hipotético. Na matriz, a cor amarela significa baixo perigo; a cor laranja significa moderado perigo; e a cor vermelha, alto (MOEL et al., 2009).

Oliveira et al. (2010) verificaram a influência da morfometria e da distribuição espacial das chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí, utilizando dados SRTM, séries históricas de chuva e um modelo matemático de previsão de cotas. A metodologia envolve a manipulação de dados SRTM, a delimitação das sub-bacias e extração de variáveis morfométricas e a elaboração de um índice de influência, conjugando as variáveis morfométricas para identificação das bacias que mais contribuem nas enchentes.

Na análise da precipitação, Oliveira et al. (op. cit.) verificaram a distribuição espacial das chuvas nas bacias e a influência desta em erros de previsão do modelo matemático e constataram que a concentração de chuvas em bacias com maior índice de influência de enchentes induz a uma subestimação da cota no modelo matemático. Graciosa (2010) propôs um modelo de seguros baseado no princípio do seguro indexado, em que o pagamento de indenizações é vinculado à variável climática (vazão de cheia). Para tanto, a autora utilizou ferramentas de modelagem e simulação hidráulica-hidrológica para gerar mapas de risco de

inundação e quantificar prejuízos correspondentes das cheias de diferentes probabilidades de ocorrência.

3.10 Geotecnologias aplicadas a estudos geoambientais

O termo geotecnologia denota o conjunto de tecnologias aplicadas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação com referência geográfica. Segundo Rosa (2005), as geotecnologias são compostas por soluções em hardware, software e peopleware que, juntas, constituem poderosas ferramentas para tomada de decisão.

Entre as geotecnologias disponíveis atualmente, Rosa (2005) destaca: os sistemas de informação geográfica (SIG's), a cartografia digital, o sensoriamento remoto, o sistema de posicionamento global (GPS) e a topografia georrefenciada.

Jensen (2009) cita que Dahlberg e Jensen (1986) e Fisher e Lindenberg (1989) sugeriram um modelo de integração entre ciências de informação geográfica (sensoriamento remoto, cartografia, sistemas de informações geográficas e levantamento) à medida que elas se relacionam com a matemática e a lógica, e com as ciências físicas, biológicas e sociais. Nesse modelo (Figura 3.11), nenhuma subdisciplina domina, e todas são reconhecidas como tendo áreas únicas, ainda que com sobreposição, de conhecimento e atividade intelectual à medida que são usadas na pesquisa científica.

Figura 3.11 - Modelo de integração entre o geotecnologias e a atividade intelectual na pesquisa científica.

Curram (1987), Clarke (2001) e Jensen (2005) citam que o sensoriamento remoto funciona em harmonia com outras ciências de informação geográfica (GIScience ou geotecnologias), incluindo cartografia, levantamento de campo, e sistemas de informação geográfica.

Florenzano (2005) e Blaschake e Kux (2007) mencionam que o geoprocessamento e o Sensoriamento remoto estão cada vez mais interligados e que as suas aplicações, em diversas áreas do conhecimento, estão cada vez mais interligadas. Para Jensen (2009) ultimamente, a velocidade e a dinâmica de interligação desses universos, cresceu consideravelmente.

A conexão cada vez mais intensa de informações de Sensoriamento Remoto e SIG num ambiente de mesa desempenhou um importante papel, permitindo o armazenamento e gerenciamento eficaz de dados como parte de um conjunto de geoinformações disponíveis e registradas.

Geotecnologias são citadas por muitos autores como ferramentas imprescindíveis para análises em diversas áreas, incluindo análises geoambientais. Nota-se atualmente que o uso de geotecnologias é indispensável em estudos de natureza geoambiental, principalmente naqueles voltados ao planejamento territorial.

Pode-se afirmar que o fluxo de trabalho de análises ambientais demanda por geotecnologias na maior parte de suas etapas (Figura 3.12).

Na etapa de estabelecimento do problema, formulam-se hipóteses e seleciona-se o modelo mais apropriado. Na fase de coleta, efetua-se o inventário e levantamento de dados pré-existentes, levantamento de campo, mensurações, monitoramento e aquisição de imagens de satélite e/ou fotografias aéreas.

A etapa de conversão de dados em informações é a que demanda mais tempo. Nessa fase, efetua-se o processamento analógico e digital de imagens, a digitalização de informações, o levantamento de campo, testes de hipóteses, modelagem, análise estatística espacial. A última etapa envolve a apresentação de informações na forma de imagens, mapas, análises estatísticas, relatórios, entre outros.

Figura 3.12 - Principais etapas de avaliações ambientais envolvendo geotecnologias (adaptado de Jensen, 2009).

Santos (2004) destaca a utilização de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, no planejamento, voltado ao ordenamento do monitoramento do uso e ocupação do solo por meio do gerenciamento dos recursos hídricos em bacias, como uma metodologia de compreensão da dinâmica natural e ação sobre a natureza. Tais técnicas têm o potencial de suprir a demanda imposta pela emergência de problemas ambientais da atualidade, de forma a mitigar e/ou recuperar os danos causados pelas atividades antropogênicas.

“As soluções oferecidas pela inteligência geográfica, envolvendo tanto técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, proporcionam ferramentas indispensáveis para fins de manipulação, análise, modelagem e visualização de dados distribuídos no espaço e no tempo” (AUGUSTO FILHO, 2012).

Atualmente, a maioria das aplicações das geotecnologias está ligada à gestão municipal, ao meio ambiente, ao planejamento estratégico de negócios, a agronegócios e a

utilidades (ROSA, 2005). Fitz (2008) enfatiza a importância do geoprocessamento nas áreas de: Cartografia; Recursos naturais; Transporte; Comunicação; Energia e Planejamento Urbano e Regional.

Câmara e Medeiros (1998) destacam o potencial de ferramentas disponíveis nos SIG's atuais na análise de componentes ambientais e apontam quatro campos de atuação, associados aos estudos ambientais que lançam mão das referidas ferramentas, tais como: mapeamento temático, diagnóstico ambiental, avaliação de impacto ambiental e ordenamento territorial.

Kux et al. (2005) citam aplicações relacionadas à detecção de alterações ambientais que os sistemas sensores atuais (como satélites de alta resolução geométrica, sistemas hiper-espectrais, câmeras aero fotográficas digitais, etc.) têm capacidade de detectar. "Atualmente há uma enorme quantidade de informações fornecidas por sensores que nos permite conhecer melhor o nosso planeta, sendo uma ferramenta indispensável ao inventário, mapeamento e monitoramento de recursos naturais" (ROSA, 2005).

Florenzano (2005) discute que os produtos de sensores orbitais permitem uma visão multitemporal de extensas áreas da superfície terrestre e que os SIG's possibilitam uma visão tridimensional do espaço e a obtenção automatizada de diversos parâmetros essenciais para a caracterização ambiental.

Augusto Filho (2012) cita características dos SIG's atuais importantes em estudos de natureza ambiental. O autor destaca que a partir de funções de análise espacial, disponíveis em programas SIG, a possibilidade de criação de modelos de análise e a combinação de várias dessas funções em uma estrutura lógica e automatizada. Isso permite ao usuário a realização de diagnósticos e de prognósticos, com diferentes cenários, o que seria inviável de forma manual.

3.10.1 GPS

O GPS, abreviatura de NAVSTAR GPS (Navigation System with Time And Ranging Global Positioning System), segundo Rosa (2005), consiste em um sistema de radio-navegação baseado em satélites, desenvolvido e controlado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (U.S. DoD), que permite a qualquer usuário saber a sua localização,

velocidade e tempo, 24 horas por dia, sob quaisquer condições atmosféricas e em qualquer ponto do globo terrestre.

Esse sistema é amplamente utilizado em atividades de campo, tanto para fins de navegação quanto para levantamento de dados.

3.10.2 *Sensoriamento Remoto*

O sensoriamento remoto constitui na tecnologia ou no conjunto de técnicas que utilizam sensores para a obtenção de imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre através do registro da sua energia refletida ou emitida (FLORENZANO, 2002). O IBGE (2006) cita que o objetivo desse conjunto de técnicas é a aquisição de informações, imagens e/ou sinais elétricos para estudo do ambiente terrestre.

Jensen (2009) cita que Robert Green do JPL (NASA) defende que o sensoriamento remoto consiste no registro da informação das regiões do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos, tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares e/ou matriciais localizados em plataformas, tais como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento de imagens de satélite.

Pode-se definir sensoriamento remoto, de uma maneira geral, como o conjunto de técnicas de captação, registro e tratamento de informações, obtidas a partir da energia eletromagnética refletida/emitida de objetos, sem tocá-los.

Rosa (2005) cita que o sensoriamento remoto envolve duas fases, a saber:

- Aquisição de dados - Na fase de aquisição são fornecidas as informações referentes à radiação eletromagnética, aos sistemas sensores, ao comportamento espectral dos alvos, à atmosfera, etc...
- Utilização de dados - Na fase de utilização são mencionadas as diferentes possibilidades de aplicação desses dados nas várias áreas do conhecimento, assim como Geografia, Agronomia, Engenharia Civil, Geologia, Hidrologia, Pedologia, etc...

De acordo com Jensen (2009), os dados de sensoriamento remoto são analisados usando-se uma variedade de técnicas de processamento de imagens, incluindo tanto o

processamento analógico quanto o processamento digital de imagens. Ambas as análises de sensoriamento remoto buscam detectar e identificar fenômenos importantes na cena.

Segundo Collares (2000), o processamento digital de imagens de satélite é o conjunto de procedimentos relativos à manipulação e análise de imagens por meio de um sistema informatizado.

A Figura 3.13 mostra os principais processamentos analógicos e digitais de imagens que lançam mão de elementos da interpretação de imagens. Segundo Jensen (2009) os principais tipos de processamento digital de imagens incluem: o pré-processamento de imagens, o realce das imagens, o reconhecimento de padrões usando estatísticas inferenciais, o processamento fotogramétrico de imagens usando imagens estereoscópicas, classificação e detecção de mudanças.

Liu (2006) separa 3 grupos de técnicas principais de processamento de imagens de satélite:

- o pré-processamento, que abrange técnicas de processamento da imagem digital bruta registrada pelos sensores, tais como: correções radiométricas, atmosféricas e geométricas;
- o processamento, que envolve técnicas como calibrações radiométricas, correção atmosférica, correção geométrica, eliminação de contaminação de nuvens, filtragem dos ruídos de sinais, extração de fisionomia, processamento de dados SAR, extração de informação das imagens SAR, classificação e segmentação de imagens SAR; e
- o pós-processamento, que engloba técnicas de refinamento de resultados obtidos, na fase de processamento, como o uso de filtros de limpeza, aglutinação e separação de classes, funções de generalização e refinamento manual. Essa função assegura a obtenção de um documento cartográfico sem ruídos (COLLARES, 2000).

Uma das principais ferramentas de análise de imagens multiespectrais diz respeito aos métodos de classificação automática dessas imagens (FITZ, 2008).

Figura 3.13 - Processamentos analógico e digital de imagens de sensoriamento remoto que utilizam os elementos de interpretação de imagens (JENSEN, 2009).

Para a classificação apoiada em computador, são utilizadas assinaturas espectrais específicas, as quais são associadas a classes de cobertura do terreno. Conforme IBGE (2006), para a definição dos padrões espectrais para a classificação supervisionada, as amostras de treinamento são fortemente auxiliadas pelas amostras de campo, que são pontos de GPS obtidos no terreno.

A classificação automática de imagens pode ser categorizada em:

- classificação não supervisionada, que utiliza de análises de agrupamento (cluster analysis). Os principais algoritmos dos métodos são: ISODATA e K-Means.

- classificação supervisionada, que se baseia no uso de classificadores que lançam mão de funções estatísticas para analisar e comparar características de refletância espectral dos pixels. Os métodos de classificação supervisionada mais utilizados são: Análise de Componente Principal (Principal Component Analysis – PCA), Classificador de Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Classifier – MLC), Modelo de Matrizes Co-Ocorrências de Nível de Cinza (Grey Level Co-occurrence Matrix – GLCM), Krigagem, Modelo de Mistura Linear (Linear Mixture Model, LMM), Paralelepípedo (Parallel Pipeline), Espaço-S, Percepção Camada Múltipla (Multilayer Perceptron – MLP), Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Networks – ANNs), Máquina de Vetor de Suporte (Support Vector Machines – SVM).

Outros pesquisadores usam combinações de diferentes imagens digitais adquiridas pelos diferentes satélites e aplicam sobre elas diferentes métodos de classificação e combinações de dados de refletâncias espectrais, temporais e espaciais para tentar aperfeiçoar suas classificações (LIU, 2006).

Ehlers (2005) menciona diversas aproximações metodológicas com esses dados, entretanto, ressalta que ainda precisam ser desenvolvidos métodos padronizados, que possam utilizar o potencial pleno desses sistemas sensores para novas aplicações operacionais.

Lang (2009) discute que, apesar das potencialidades das concepções automáticas de classificação, elas estão longe de alcançar a capacidade da interpretação da detecção humana, que apresenta nítida superioridade para a detecção de estruturas situadas em um contexto.

Blaschke e Strobl (2001) e Blaschke (2005) citam que a interpretação de imagens dos novos sistemas sensores constitui uma área de pesquisa extremamente atual, sendo que o desenvolvimento de procedimentos de interpretação automática constitui um grande desafio para a área de Sensoriamento Remoto.

3.10.3 Geoprocessamento

Fitz (2008) define o geoprocessamento como a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Para Câmara e Davis (2001), o geoprocessamento consiste na tecnologia, ou no conjunto de tecnologias, que permite a manipulação, a análise, a simulação de modelagens e a visualização de dados georreferenciados.

Moura (2003) cita que, para a maioria dos autores, o geoprocessamento envolve o processamento digital de imagens, a cartografia digital e os sistemas de informação geográfica.

Rosa e Brito (1996) citam pelo menos quatro categorias de técnicas de tratamento espacial da informação que o geoprocessamento envolve:

1. técnicas para coleta de informação espacial, como: cartografia, sensoriamento remoto, GPS, topografia, levantamento de dados alfanuméricos;
2. técnicas de armazenamento de informação espacial, como bancos de dados orientados aos objetos, relacionais, hierárquicos, etc.
3. técnicas para tratamento e análise de informação espacial, tais como: a modelagem de dados, a geoestatística, a aritmética lógica, funções topológicas, redes, etc.;
4. técnicas para o uso integrado de informação espacial, como os sistemas GIS – Geographic Information Systems, LIS – Land Information Systems, AM/FM – Automated Mapping/Facilities Management, CADD – Computer-Aided Drafting and Design.

3.10.4 Sistemas de Informação Geográfica – SIG's

Jensen (2009) cita que o uso integrado de técnicas de coleta, armazenamento e tratamento de informações espaciais é viabilizado por sistemas GIS (*Geographical Information System*), LIS (*Land Information Systems*), AM/FM (*Automated Mapping/ Facilities Management*) e CAD (*Computer Aided Design*).

Rocha (2000) define o SIG como um sistema com capacidade para aquisição, armazenamento, tratamento, integração, processamento, recuperação, transformação, manipulação, modelagem, atualização, análise e exibição de informações digitais

georreferenciadas, topologicamente estruturadas, associadas ou não a um banco de dados alfanuméricos.

Para Rosa (2005), o SIG é um conjunto de ferramentas computacionais composto de equipamentos e programas que, por meio de técnicas, integra dados, pessoas e instituições, de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento, a análise e a oferta de informação georeferenciada produzida por meio de aplicações disponíveis, que visam a maior facilidade, segurança e agilidade nas atividades humanas referentes ao monitoramento, planejamento e tomada de decisão relativa ao espaço geográfico.

Augusto Filho (2005) explica que os SIG modernos resultaram da junção de várias disciplinas e técnicas de processamento de dados, tais como, desenho digital e computação gráfica; fotogrametria, análises espaciais utilizando dados raster, interpolação de dados pontuais e sensoriamento remoto. O SIG moderno evoluiu basicamente da combinação de programas de bancos de dados, sensoriamento remoto e desenho digital em uma única estrutura funcional (AUGUSTO FILHO, 2012).

Observa-se atualmente uma grande variedade de softwares de SIG disponíveis. Rosa (2005) e Robaina (2009) destacam alguns dos principais softwares de SIG, a saber: ArcGIS, Autodesk Map, Spring, Idrisi, Envi, GRASS, Global Mapper, TrackMaker, MapInfo e Surfer.

O autor Rosa (2005) menciona que o software (programa de processamento, análise e armazenamento de dados) é apenas um dos componentes dos SIG, o qual possui também os seguintes elementos: hardware, dados, usuários e metodologias de análise.

Apesar da diversidade de softwares, Augusto Filho (2012) estabelece um conjunto comum de características de todos, tais como:

- utilizam meios digitais,
- necessitam de uma base de dados integrada, georreferenciada e com controle do erro;
- contêm funções de análise desses dados;
- realizam operações algébricas simples, complexas e lógicas (igual a, maior que, pertence a, entre outras); e

- estão relacionados a outras técnicas e tecnologias digitais e computacionais (banco de dados, desenho digital, sensoriamento remoto etc.).

Augusto Filho (2012) aponta uma estrutura geral dos programas de SIG atuais. A Figura 3.14 mostra a arquitetura, as saídas e as entradas típicas do SIG atual, cujos principais componentes são: banco de dados espacial e de atributos; sistema de representação cartográfica; sistema de digitalização de mapas; sistema de gerenciamento de dados; sistema de análise geográfica; sistema de processamento de imagens; sistema de análise estatística.

Figura 3.14 - Arquitetura, saídas e entradas típicas de um SIG atual (adaptado de EASTMAN, 2003).

Os dados em um sistema de informações geográficas podem ser divididos, basicamente em:

- dados gráficos – também chamados de dados geográficos, retratam as formas e a localização de objetos e de dados pontuais. Esses dados podem estar nos formatos matricial (ou raster) e vetorial (ou vetor).

- dados não gráficos – também chamados de dados alfanuméricos, são dados descritivos de atributos dos objetos (atributos de dados espaciais) e de pontos (atributos georreferenciados).

Os principais grupos de funções de análise de dados, disponíveis na maioria dos programas de SIG atuais, podem estar distribuídas em diferentes módulos e aplicativos específicos, dependendo do tipo e da capacidade destes programas. Os principais grupos de funções de análise de dados em SIG:

- Consulta ao banco de dados georreferenciado
- Medidas
- Reclassificação
- Normalização
- Tabulação cruzada
- Sobreposição
- Ponderação
- Análise de vizinhança
- Interpolação determinística e geoestatística
- Análise estatística
- Análise de rede

4 Material e métodos

4.1 Material

Dentre os materiais utilizados, pode-se citar:

a) Softwares:

- De geoprocessamento e sensoriamento remoto: AutoCadMap2012®, ArcGis10®, ENVI4.8® e *TerraView 4.2.2*.
- De processamento de dados hidrológicos: SISCAH

b) Dados hidro-climatológicos, no formato digital (.xls e .mdb), disponibilizados pelas seguintes instituições: Agência Nacional de Águas (ANA), Furnas Centrais Elétricas, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Cooxupé e Cooparaíso.

c) Banco de dados do cadastro de usuários de recursos hídricos elaborado por (CARVALHO et al., 2012).

d) Diagnóstico de situação do abastecimento de água e esgotamento sanitário, incluindo o banco de dados do cadastro de pontos de lançamento de efluentes e captação de água para abastecimento urbano, preparado por (SASSO, 2010).

e) Documentos cartográficos:

- Base topográfica, no formato digital vetorial, incluindo: curvas de nível, pontos cotados, rede de drenagem, hierarquizada conforme a proposta de Strahler (1952). Digitalizada a partir de cartas topográficas do IBGE na escala 1:50.000 por Magri e Collares (2011) e Gomes e Collares (2010)₁.
- Mapa de compartimentação da área em unidades ambientais e macrounidades, no formato digital vetorial. Gerado por Gomes e Collares (2010)₁, a partir da base topográfica, supracitada.
- Mapa geológico na escala 1:100.000 nos formatos digitais vetor e raster. Gerado por Gomes e Collares (2010)₂ a partir da

compilação e verificação de campo de mapas geológicos produzidos nas seguintes instituições: CPRM, UNESP, COMIG e UERJ.

- Mapa pedológico, na escala 1:250.000, nos formatos vetorial e raster, gerado e disponibilizado por Amaral (2005).
- Mapa pedológico na escala 1:100.000, nos formatos raster e vetorial. Gerado e disponibilizado por Andrade e Fonseca (2013).
- Carta de suscetibilidade a erosão elaborada por (MAGRI, 2013).
- Mapa de predomínio textural elaborado por (MAGRI, 2013).

f) Imagens de satélite:

- Imagens do satélite SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) que foram corrigidas e padronizadas (eliminação de falhas, sombras e distorções e georreferenciamento) por pesquisadores da EMBRAPA Monitoramento por Satélite (MIRANDA, 2005).
- Imagens do satélite ALOS datadas de 2009, disponibilizadas pelo projeto *“Grande Minas: União Pelas Águas”*.
- Imagens do satélite Landsat5 disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

4.2 Métodos

A metodologia deste trabalho envolveu basicamente:

- a) revisão bibliográfica;
- b) levantamento de informações já existentes, como documentos cartográficos e dados hidro-climatológicos;
- c) elaboração e análise de documentos cartográficos básicos e interpretativos envolvendo técnicas de:
 - o tratamento e análise estatística de séries históricas de dados de temperatura, pluviosidade e vazão;

- processamento e classificação de imagens de satélite;
 - avaliação e atribuição de pesos aos indicadores e atributos influentes nos processos estudados;
 - manipulação matemática e computacional e análise de indicadores dos meios físico, biótico e socioeconômico e
- d) apresentação e análise de resultados.

Vale ressaltar que os resultados obtidos na etapa de elaboração de documentos cartográficos foram constantemente avaliados principalmente através de técnicas de análise estatística espacial.

Sabe-se que a bacia hidrográfica deve ser considerada como unidade de gestão e planejamento de recursos hídricos. Logo para efetuação de análises direcionadas à potencialidades hidrológicas e para o subsídio à políticas de gestão de recursos hídricos a região do Médio Rio Grande foi subdividida em unidades e macrounidades ambientais. Os critérios de delimitação e de codificação dos compartimentos foram voltados à compreensão das suas principais características da rede de drenagem (ver Item 6.1)

A análise dos resultados obtidos foi dividida em três fases:

- básica, envolvendo aspectos de uso e ocupação, clima, fluviometria e geomorfometria;
- intermediária, com integração de dados, englobando análises de potencialidades de escoamento superficial, de demanda qualitativa da água e de morfometria de bacias (cheias relâmpago, inundação de planícies, regularização de vazão).
- final, com integração geral dos dados, envolvendo as análises de potencialidades: de cheias relâmpago, de inundação de planícies e de disponibilidade hídrica.

As peculiaridades referentes aos aspectos metodológicos adotados em cada etapa de análise são descritos nos seus respectivos capítulos.

5 Caracterização da área de estudo

5.1 Localização

Os principais aspectos de localização da região estudada são retratados pela Figura.5.1.

Figura 5.1 - Localização da área de estudo, a região do Médio Rio Grande (unidade de gerenciamento de recursos hídricos do CBH-GD7).

A região do Médio Rio Grande (GD7) está localizada no sudeste do Brasil, em Minas Gerais. Mais especificamente, encontra-se na porção sudoeste do estado de Minas Gerais, entre as latitudes 20°2'16"S e 21°13'42"S, as longitudes 46°11'36"W e 47°18'36"W (Datum horizontal de referência: South American 1969).

Apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 9.800km² e envolve, completa ou parcialmente, 22 municípios: Alpinópolis; Bom Jesus da Penha; Capetinga; Cássia; Claraval; Delfinópolis; Fortaleza de Minas; Ibiraci; Itamoji; Itaú de Minas; Jacuí; Monte Santo de Minas; Nova Resende; Passos; Pratápolis; Sacramento; São João Batista do Glória; São José da Barra; São Pedro da União; São Roque de Minas; São Sebastião do Paraíso; São Tomás de Aquino.

O Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC) ocupa uma expressiva área localizada na porção noroeste da área de estudo (Figura 5.1), nos municípios de São Roque de Minas, Delfinópolis e São João Batista do Glória. Aproximadamente 12% (1170km²) da região do Médio Rio Grande é ocupada pela referida unidade de conservação.

A Figura 5.2 mostra as principais vias de acesso à área de estudo e a sua localização em relação a Belo Horizonte (capital do estado de Minas Gerais).

Figura 5.2 - Vias de acesso e localização da região do Médio Rio Grande em relação a Belo Horizonte (capital de Minas Gerais).

As principais vias de acesso à região são as rodovias federais BR-265, BR-491, BR-262 e BR-050 e as rodovias estaduais MG-050, MG-446, MG-341, MG-438, MG-856, MG-344, MG-836, MG-832, MG-146, LMG-846, LMG-848 e SP-345.

A distância entre Belo Horizonte e a região do Médio Rio Grande é de aproximadamente 320km via rodovia estadual MG050 ou de aproximadamente 430km via rodovias federais BR381, BR369 e BR265.

5.2 Socioeconomia

A Figura 5.3 mostra gráficos de população total (senso 2010) e de IDH (médio em 2000) dos municípios que envolvem a região do Médio Rio Grande.

Figura 5.3 - Gráficos de IDH médio (2000) e população (2010) dos municípios da área de abrangência da GD7 (Dados: IBGE, 2011).

Passos e São Sebastião do Paraíso são os municípios mais populosos. São Sebastião do Paraíso é o município que apresenta o maior Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Itaú de Minas, Passos e Sacramento também apresentam valores mais elevados de IDH.

Dentre os principais usos do solo da região do Médio Rio Grande, os mais tradicionais são as lavouras de café, milho e cana-de-açúcar, além da criação de gado leiteiro.

No setor industrial, as esferas mais tradicionais são de energia, mineração e sucroalcooleira. Outros campos menores, contudo com participação na formação da cadeia produtiva são: as indústrias de móveis, calçados, material cirúrgico, confecção e laticínios, os quais têm um forte potencial de expansão.

No setor de energia, há três hidroelétricas de grande porte (Quadro 5.1) administradas por Furnas Centrais Elétricas S.A.: Furnas, Luís Carlos Barreto e Mascarenhas de Moraes, além de outras pequenas centrais hidroelétricas. As principais características das referidas hidrelétricas e seus reservatórios são apresentadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Características das hidrelétricas presentes na área de estudo (Fonte: FURNAS, 2013).

Hidrelétrica	Luís Carlos Barreto	Mascarenhas de Moraes	Furnas
Tipo	Enrocamento com núcleo de argila	Arco e gravidade	Enrocamento com núcleo de argila
Regularização	Fio d'água	Fio d'água	Regularização
Potência	1050MW	476MW	1216MW
Nível máximo de armazenamento	622,5m	666,12m	768m
Nível de máxima cheia	626,64m	666,12m	769,30m
Nível mínimo de operação	618,5m	653,12m	750m
Área inundada	46,7km ²	250km ²	1440km ²
Volume total	1,418 bilhão m ³	4,04bilhões m ³	22,95bilhões m ³
Volume útil	0,178 bilhão m ³	2,5 bilhões m ³	17,217 m ³
Descarga máxima do vertedouro	Principal - 9.350 m ³ /s Complementar - 3.100 m ³ /s	13.000 m ³ /s	13.000 m ³ /s

Devido à presença de áreas que apresentam expressiva beleza cênica na região, o turismo consiste em uma atividade de alta potencialidade de crescimento econômico. As maiores potencialidades de atividades para fins turísticos estão às margens dos grandes reservatórios artificiais (região do lago) das usinas hidroelétricas supracitadas e na região do Parque Nacional da Serra da Canastra.

No setor sucroalcooleiro, podem-se destacar usinas de açúcar e álcool que têm apresentado um expressivo desenvolvimento na região. Com relação às atividades minerárias, destacam-se jazidas de calcário em Itaú de Minas, utilizado para a produção de cimento Portland e uma das maiores unidades de extração e produção de níquel, em todo o Brasil, no município Fortaleza de Minas.

5.3 Vegetação

A Figura 5.4 mostra um esquema onde consta a distribuição espacial da vegetação, incluindo os principais biomas e suas respectivas fitofisionomias que ocorrem na região do Médio Rio Grande.

Figura 5.4 - Distribuição espacial dos biomas e fitofisionomias que ocorrem na região de estudo. (Adaptado de Scolforo et. al., 2013).

As áreas de vegetação natural envolvem fitofisionomias pertencentes aos biomas Cerrado e Mata Atlântica.

No bioma Cerrado, ocorrem as fitofisionomias: Campo, Campo Cerrado, Campo Rupestre e Cerrado. Já a fitofisionomia Floresta Estacional Semidecidual Montana é pertencente ao bioma da Mata Atlântica.

Os gráficos da Figura 5.5 mostram os percentuais de área ocupada por tipo de vegetação na área de estudo. Verifica-se o predomínio das fitofisionomias: floresta estacional semidecidual, campo rupestre e campo (limpo e sujo). Já os principais tipos de silvicultura são pinus e eucalipto.

Figura 5.5 - Percentual de área ocupada por tipo de vegetação na área de estudo em relação à área total ocupada por vegetação: (a) considerando apenas a vegetação natural (b), incluindo vegetação natural e silvicultura.

5.4 Clima

O clima da GD7, de acordo com a classificação de Köppen (1936), está indicado como Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado) (Figura 5.6).

De acordo com o mapa de clima do IBGE (2002) (Figura 5.7), a área de estudo apresenta clima tropical. A porção norte da área apresenta clima quente, semi-úmido, com 4 a 5 meses secos e temperatura média acima de 18°C. A porção sudoeste da área apresenta clima mesotérmico brando, úmido, com 1 a 2 meses secos e temperatura média entre 10 e 15°C. Predominantemente ocorre o clima subquente, úmido (3 meses secos) e semi-úmido (4 a 5 meses secos) com temperatura média variando entre 15 e 18 °C em pelo menos 1 mês.

Figura 5.6 - Classificação climática do Brasil, segundo Köppen (1936).

Figura 5.7 - Mapa de classificação climática da região de estudo (Adaptado de IBGE, 2002).

5.5 Geologia e Geomorfologia

No contexto geomorfológico a região do Médio Rio Grande é composta pelas seguintes unidades geomorfológicas: Unidade Serra da Canastra, Depressão do Rio Grande, Planalto da Bacia do Paraná e o Planalto Dissecado do Sul de Minas, que abrange a maior parte da área estudada.

Com relação aos aspectos geológicos, nesta área há dois grandes compartimentos representados pela Bacia Sedimentar do Paraná e pelo Complexo Cristalino.

A Figura 5.8 mostra o mapa que retrata a distribuição espacial do substrato rochoso na área de estudo. No Quadro 5.2 são apresentadas as unidades geológicas e substratos rochosos ocorrentes na área de estudo e o percentual de área ocupada por cada unidade.

Figura 5.8 - Mapa de substrato rochoso da região do Médio Rio Grande (adaptado de GOMES E COLLARES, 2010₂).

Quadro 5.2 - Percentual de área ocupada por classe de substrato rochoso e unidade geológica na região do Médio Rio Grande.

Substrato rochoso	(%) área	Unidades geológicas	(%) área
1-Coberturas Quaternárias	3,5	Coberturas aluvionares	1,6
		Coberturas cenozóicas indiferenciadas	2,0
2-Basalto e Diabásio	9,9	Basalto e Diabásio (Formação Serra Geral)	9,9
3-Arenito	14,2	Arenito (Formação Botucatu)	7,5
		Arenito conglomerado folhelho e siltito (Formação Aquidauana)	6,7
4-Gnaiss	23,3	Gnaisses com intercalações de xisto quartzo-xisto quartzito e anfibolito	3,4
		Gnaiss migmatítico	1,3
		Gnaiss com intercalações de xisto quartzito e anfibolito	14,4
		Migmatitos e granitóides gnaissificados graníticos a granodioríticos. Localmente com lentes dioríticas anfibolíticas e ultramáficas	4,2
5-Xisto	3,7	Xisto e Filito com ocorrência local de gnaiss e mármore	0,3
		Filitos e metadiamectitos	0,1
		Mica-xisto com ocorrências ocasionais de quartzito e lentes de mármore	2,8
		Filito com intercalações ocasionais de quartzito	0,5
6-Quartzito	12,8	Quartzito com intercalações de mica-xisto	5,3
		Quartzito com intercalações ocasionais de mica-xisto e filito	6,5
		Metaarenito com intercalações de quartzo-xisto quartzito filito metaconglomerado	0,9
7-Rochas Ultramáficas	1,8	Rochas ultramáficas	1,1
		Rochas ultramáficas com intercalações de gnaiss e metassedimentos	0,6
		Anfibolitos e gnaisses dioríticos	0,1
8-Milonito	1,0	Milonito e localmente gnaisses associados a rochas ultramáficas	1,0
9-Rochas Calcissilicáticas	0,1	Rochas calcissilicáticas	0,1
10-Xisto/Quartzito	24,4	Mica-xisto com intercalações de quartzo-xisto quartzito anfibolito e gnaiss	16,0
		Mica-xisto com intercalações comuns de quartzito	4,3
		Mica-xisto com intercalações de quartzo-xisto e quartzito. Ocasionalmente lentes de rochas metabásicas	4,1
11- Gnaiss/Xisto	1,3	Gnaiss e xisto com intercalações ocasionais de quartzito anfibolito e rocha calcissilicática	1,3
12-Gnaiss/Rochas Ultramáficas	3,9	Gnaiss e migmatitos com intercalações de anfibolitos ultramáficas e metassedimentos	3,9

Localmente ocorrem calcários e rochas metabásicas. A maior parte da área de estudo (aproximadamente 76%) é ocupada por rochas do Complexo Cristalino, que é representado, predominantemente, por rochas metamórficas como quartzito, milonito, xisto, mica-xisto, filito e gnaisses, pertencentes aos grupos Canastra, Bambuí e Araxá, além do Complexo Barbacena.

As rochas da Bacia do Paraná pertencem às formações Botucatu (arenitos), Serra Geral (basaltos e diabásios) e Aquidauana (arenitos e diamictitos). Essas unidades localizam-se na porção oeste da área de estudo, e ocupam aproximadamente 24% da região de estudo.

5.6 Solos

Na unidade de gerenciamento de recursos hídricos do CBH-GD7, há a ocorrência de variados tipos de solos. Dada à extensão territorial da região estudada, a espessura e a textura desses materiais inconsolidados apresentam expressiva variação.

A Figura 5.9 mostra o mapa pedológico da região de estudo (AMARAL, 2005). Nessa área ocorrem predominantemente: neossolos litólicos, nitossolos vermelhos, argissolos vermelho amarelos, latossolos vermelhos férricos e latossolo vermelho e vermelho amarelos.

Figura 5.9 - Mapa pedológico (AMARAL, 2005).

5.7 Recursos hídricos superficiais e sub-superficiais

A Figura 5.10 mostra o contexto hidrológico federal e estadual em que a região de estudo está envolvida. Essa unidade está inserida na unidade federal de planejamento hídrico do Rio Grande, que é parte da área de contribuição da bacia do Rio Paraná.

Figura 5.10 - Localização da área de estudo em relação a bacias e unidades de planejamento hídrico estaduais e federais.

A área de estudo consiste na UPH (Unidade de Planejamento Hídrico) estadual, denominada “GD7” e envolve afluentes mineiros das porções baixa e média do Rio Grande.

O informativo “Conjuntura de Recursos Hídricos no Brasil 2012”, publicado por ANA (2012), destaca a bacia do Paraná como sendo notadamente a região com a maior demanda para uso consuntivo da água no Brasil (Figura 5.11).

Figura 5.11 - Vazão retirada por tipo de uso e por região hidrográfica em 2010 (ANA, 2012).

Conforme os resultados apresentados pela ANA (op. cit.), na região hidrográfica do Paraná, em 2010, a vazão total outorgada foi de 736m³/s. Essa demanda representa 31% da demanda hídrica nacional. Nota-se também que, do valor total outorgado, a maior parte é destinada à irrigação (42%), ao uso industrial (28%) e ao abastecimento urbano (24%) (Figura 5.12).

A situação dos principais rios brasileiros quanto à relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica é mostrada na Figura 5.13. Nota-se que apesar dos altos níveis de demanda hídrica na região hidrográfica do Paraná, a maior parte dos rios (77%) é classificada pela ANA como com em uma situação “excelente” ou “confortável”. Na região da GD7 (afluentes mineiros do Alto e Baixo Rio Grande), os rios classificados apresentaram relação demanda/disponibilidade excelente e confortável, ou seja, os rios avaliados na área de estudo apresentam valores de 0 a 10% de demanda em relação ao total de água disponível.

Figura 5.12 - Uso consuntivo da água na região hidrográfica do Paraná em 2010 (Fonte: ANA, 2012).

Com relação à situação qualitativa da água, os principais rios da região de estudo apresentam uma relação entre a carga orgânica lançada e a capacidade de assimilação “ótima” e “boa” (Figura 5.14).

Figura 5.13 - Situação dos principais rios da área de estudo quanto à relação demanda versus disponibilidade hídrica superficial (Adaptado de ANA, 2012).

Figura 5.14 - Situação dos principais rios da área de estudo quanto à relação entre carga orgânica lançada e carga orgânica assimilável (Adaptado de ANA, 2009).

Na Figura 5.15 são apresentados esquemas mostrando as curvas de rendimento específico médio de longo período e médio mensal com duração de 7 dias e recorrência de 10 anos.

Figura 5.15 - Curvas de rendimento específico médio de longo período (a) e rendimento específico médio mensal com duração de 7 dias e recorrência de 10 anos (b) (adaptado de SOUZA, 1993).

O rendimento específico varia entre 10 e 30 l/s.m. As contribuições específicas mínimas com duração de 7 dias e recorrência de 10 anos variam entre 5 e 7 l/s.m.

Conforme pode-se observar no mapa de aquíferos do estado de Minas Gerais (Figura 5.16), os principais sistemas são: o arenítico, o quartzítico, o xistoso e o gnáissico-granítico. O sistema arenítico é o que possui a maior produtividade e os sistemas xistoso e gnáissico-granítico são os que possuem menores níveis de produtividade.

Figura 5.16 - Mapa de aquíferos do estado de Minas Gerais (SOUZA, 1995).

6 Obtenção e tratamento de dados e análise das informações

6.1 Compartimentação da área de estudo em macrounidades e unidades ambientais

A região de estudo foi compartimentada por Gomes e Collares (2011)₁ em dois níveis hierárquicos: macrounidades e unidades ambientais.

No presente trabalho, efetuaram-se adaptações sobre a compartimentação realizada por Gomes e Collares (op. cit.). O objetivo principal desse procedimento foi o de agrupar unidades ambientais, com ordem de ramificação inferior a 4ª (segundo classificação de Strahler, 1952) e, conseqüentemente, reduzir o nível de fragmentação dessas unidades e reorganizar as macrorregiões conforme seus diferentes padrões hidrológicos.

Os critérios de delimitação e de codificação dos compartimentos foram voltados à compreensão das suas principais características hidrográficas.

Dessa forma, a área do Médio Rio Grande foi dividida em macrounidades, as quais estão compartimentadas em unidades ambientais. Os critérios de compartimentação são definidos a seguir.

- **Macrounidades ambientais:**

- a) Bacias hidrográficas contidas na região do Médio Rio Grande, cuja ordem de drenagem é igual ou superior à 5ª e que desaguam diretamente na porção média do rio Grande.

Nomenclatura: MB_m[código](ordem)

- b) Bacias hidrográficas contidas na região do Médio Rio Grande, cuja ordem de ramificação da drenagem é igual ou superior à 5ª e não desaguam na porção média do Rio Grande. Essas bacias fluem para os rios Sapucaí, Esmeril e Canoas (no estado de São Paulo), os quais desaguam diretamente na porção baixa do Rio Grande.

Nomenclatura: MB_b[código](ordem)

- c) Grupo de unidades ambientais com ordem de ramificação igual ou inferior a 4ª, agrupadas devido a sua similaridade de padrões hidrológicos e proximidade, as quais desaguam diretamente na porção média do Rio Grande e dividem essa região de unidades que margeiam o lago.

Nomenclatura: MGU_m[código](ordem)

- d) Grupo de unidades ambientais com ordem de ramificação igual ou inferior a 4ª, agrupadas pela sua similaridade de padrões hidrológicos e proximidade, as quais fluem para os rios Sapucaí e Canoas (cujas bacias de drenagem estão nos estados de São Paulo e Minas Gerais), os quais desaguam na porção baixa do Rio Grande (em São Paulo).

Nomenclatura: MGU_b[código](ordem)

A chave de codificação das macrounidades ambientais é mostrada na Figura 6.1.

Figura 6.1 - Chave de codificação das macrounidades ambientais.

- **Unidades ambientais:**

- a) Bacias hidrográficas de 4ª ordem.

Nomenclatura: U [macrounidade] ord4 [**]

- b) Unidades ambientais com ordem de drenagem inferior a 4ª, agrupadas devido a sua similaridade de padrões hidrológicos e proximidade, as quais devido estão na maioria dos casos associadas ao leito do rio principal da macrounidade a que pertencem.

Nomenclatura: U [macrounidade] [máxima ordem do leito principal] [**]

A Figura 6.2 apresenta a chave de codificação das unidades ambientais.

Figura 6.2 - Chave de codificação das unidades ambientais.

Os mapas de compartimentação da área de estudo são mostrados nas Figuras 6.3 e 6.4 e no Apêndice B.

A área é composta por 30 macrounidades ambientais e 289 unidades ambientais.

Dentre as 30 macrounidades que compõem a área de estudo:

- 17 macrounidades são bacias hidrográficas de 5ª à 8ª ordem de drenagem, que desaguam diretamente na porção média do Rio Grande;
- 2 macrounidades constituem bacias hidrográficas de 5ª e 6ª ordem de ramificação, que desaguam diretamente em afluentes da porção baixa do Rio Grande.
- 9 macrounidades são grupos de unidades ambientais que margeiam a região do lago e
- 2 macrounidades constituem grupos de unidades ambientais que desaguam diretamente em afluentes da porção baixa do Rio Grande.

Figura 6.3 - Mapa de delimitação das macrounidades ambientais.

Figura 6.4 - Mapa de delimitação das unidades ambientais.

No Quadro 6.1 pode-se notar a quantidade de bacias hidrográficas existentes na área de estudo por ordem de ramificação (4ª a 8ª ordem).

Quadro 6.1 - Quantidade de bacias hidrográficas na área de estudo por ordem de ramificação (4ª a 8ª ordem).

Ordem de ramificação	Quantidade
4ª ordem	205
5ª ordem	39
6ª ordem	11
7ª ordem	2
8ª ordem	1

Dentre as unidades ambientais, há 1 bacia hidrográfica de 3ª ordem e 205 bacias hidrográficas de 4ª ordem de ramificação. As demais unidades margeiam cursos d'água de 5ª (46 unidades), 6ª (18 unidades), 7ª (7 unidades) e 8ª (12 unidades) ordem de ramificação.

6.2 Análises básicas

6.2.1 Uso e ocupação

As principais etapas metodológicas (Figura 6.5) que envolveram a caracterização do uso e ocupação foram: pré-processamento de imagens, levantamento de campo, compartimentação da área em setores, seleção de amostras de treinamento, delimitação analógica de alvos, classificação automática e supervisionada da imagem de satélite, sobreposição de classes mapeadas, refinamento da classificação, vetorização, quantificação, análise e refinamento de resultados.

Para delimitação/detecção das diferentes classes de uso e ocupação atual do solo, foram utilizadas imagens do satélite ALOS, datadas de 2009 e imagens do satélite Landsat5, datadas de 1984.

Os softwares utilizados foram o Envi 5.0® e ArcGis10®; o primeiro foi utilizado na aplicação de métodos que envolveram processamento das imagens de satélite, e o segundo foi utilizado na delimitação analógica de alvos, no refinamento dos resultados, na estruturação do mapa final e na quantificação e análise dos resultados.

Figura 6.5 - Fluxograma de etapas para caracterização do uso e ocupação.

6.2.1.1 Obtenção e tratamento básico das imagens de satélite

A delimitação/detecção de alvos referentes a diferentes formas de uso e ocupação do terreno lançou mão de imagens obtidas a partir de sensores a bordo dos satélites ALOS e Landsat5. As principais características das imagens, os tratamentos básicos realizados sobre elas e sua aplicação nesse trabalho estão descritas a seguir.

g) Imagem ALOS

As imagens do satélite ALOS foram utilizadas para delimitação e classificação de atividades de uso e ocupação do terreno e na detecção de atividades pontuais.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2, podem-se notar as datas de aquisição das imagens pancromáticas e multiespectrais. Nas Figuras 6.6 e 6.7, são apresentados os croquis demonstrando a disposição espacial e os códigos dos referidos produtos.

As bandas do sensor multiespectral AVINIR-2 de resolução espacial correspondente a 10 metros foram obtidas já fusionadas com a banda pancromática, do sensor PRISM, com resolução espacial (2,5 metros) nas composições coloridas R4G3B2 e R3G2B1, georreferenciadas e ortorretificadas. Assim, realce e mosaicagem, foram os únicos procedimentos de pré-processamento aplicados sobre as imagens ALOS.

Nas Figuras 6.8 e 6.9, podem-se notar, respectivamente, as imagens nas composições R4G3B2 e R3G2B1, com a sobreposição das delimitações dos macrounidades da área de estudo. Essas imagens registram ondas eletromagnéticas na faixa entre 0,52 e 0,89 microns.

Tabela 6.1 - Datas de aquisição das imagens pancromáticas e seus respectivos códigos.

Imagem Pancromática	
Data	Código da Imagem
21/4/2009	1
10/7/2009	2;3;4;5;6;7
27/7/2009	8;9;10;11;12
8/8/2009	13;14;15;16;17;18

Figura 6.6 - Croqui ilustrativo da disposição espacial das imagens pancromáticas e seus respectivos códigos. (Fonte: IMAGEM, 2009)

Figura 6.8 - Imagem de ALOS na composição R4G3B2.

Figura 6.9 - Imagem de ALOS na composição R3G2B1.

h) Imagem Landsat5

As imagens obtidas a partir do sensor TM do satélite Landsat5 contribuíram tanto na caracterização de uso e ocupação do terreno quanto na caracterização de aspectos climatológicos da área de estudo.

Na Tabela 6.3 estão apresentadas as principais características (resolução espectral e espacial) de cada banda das imagens utilizadas. A data de aquisição, os

códigos identificadores e a disposição espacial das imagens Landsat5 utilizadas, podem ser verificados na Tabela 6.4 e na Figura 6.10.

Para a caracterização climática foram utilizadas todas as bandas referentes às datas apresentadas na Tabela 6.4. Já na caracterização do uso e ocupação foram utilizadas apenas as bandas 3, 4 e 5 das imagens, datadas de 1984.

Para fins de caracterização do uso e ocupação, os procedimentos de pré-processamento realizados sobre esses produtos foram: a calibração radiométrica, o realce, a combinação de bandas e a mosaicagem. Vale ressaltar que, nesse caso, a composição de bandas foi: R4G5B3. Na Figura 6.11, é possível visualizar a imagem na composição R4G5B3 com a sobreposição da delimitação dos municípios e da área de estudo.

Tabela 6.3 - Principais características das bandas do sensor TM a bordo do satélite Landsat5.

Banda	Intervalo espectral (μm)	Resolução espacial (m)
1	(0,45 - 0,52)	30
2	(0,52 - 0,60)	30
3	(0,63 - 0,69)	30
4	(0,76 - 0,90)	30
5	(1,55 - 1,75)	30
6	(10,4 - 12,5)	120
7	(2,08 - 2,35)	30

Tabela 6.4 - Datas e horários de aquisição das imagens Landsat5 e seus respectivos códigos.

Código	Órbita	Ponto	Data	Horário
A	219	74	15/07/1984	12:32
B	219	75	16/07/1984	12:32
C	220	74	06/07/1984	12:38
D	220	75	06/07/1984	12:38
A	219	74	21/05/1993	12:26
B	219	75	21/05/1993	12:26
C	220	74	13/06/1993	12:32
D	220	75	13/06/1993	12:32
A	219	74	27/09/1999	12:39
B	219	75	27/09/1999	12:39
C	220	74	02/09/1999	12:47
D	220	75	02/09/1999	12:47
A	219	74	23/08/2004	12:46
B	219	75	23/08/2004	12:47
C	220	74	30/08/2004	12:53
D	220	75	30/08/2004	12:53
A	219	74	17/07/2008	12:50
B	219	75	17/07/2008	12:50
C	220	74	08/07/2008	12:56
D	220	75	08/07/2008	12:57

Figura 6.10 - Croqui ilustrativo da disposição espacial das imagens Landsat5 e seus respectivos códigos identificadores.

Figura 6.11 - Imagem de Landsat5 na composição R4G5B3.

6.2.1.2 Compartimentação da área em setores

A expressiva abrangência da área de estudo inviabiliza a classificação automatizada de toda a área em um único processamento, principalmente em função dos seguintes aspectos:

- limitações dos softwares e dos equipamentos disponíveis;
- qualidade da classificação pela heterogeneidade de classes que a área, como um todo, abrange.

Objetivando a viabilização da classificação automatizada com maior agilidade e melhor qualidade, optou-se pela compartimentação da área de estudo em setores. O mapa com a delimitação de tais setores encontra-se na Figura 6.12.

Figura 6.12 - Mapa de delimitação da área em setores para a classificação do uso e ocupação.

Para delimitação dos setores, foram adotados os seguintes critérios:

- agrupar macrounidades e unidades ambientais próximas,
- seguir a delimitação das macrounidades e unidades ambientais,
- agrupar unidades que, a princípio, parecem ter padrões de ocupação territorial similares.

A princípio, a área de estudo foi compartimentada em 5 setores. Posteriormente, após vários testes de classificação, os setores 3 e 5 foram subdivididos em subsetores. Essa subdivisão foi necessária em função da grande heterogeneidade de classes de uso e ocupação e da expressiva abrangência dos referidos setores. Os critérios da subdivisão foram similares aos adotados para a delimitação dos setores.

A partir da delimitação de cada setor, efetuaram-se os procedimentos de recorte e aplicação de máscaras no mosaico da imagem ALOS. Assim, obtiveram-se imagens de cada setor, contendo informações apenas de suas respectivas regiões.

A compartimentação da área, o recorte e a aplicação de máscaras sobre os compartimentos agregaram qualidade à classificação devido à redução do nível de heterogeneidade da população de valores e de refletância espectral dos pixels analisados pelas funções estatísticas dos classificadores automáticos utilizados.

6.2.1.3 Levantamento de campo

O levantamento de campo foi realizado em duas fases. Na fase inicial, o objetivo foi caracterizar as principais classes de uso e ocupação da região de estudo e coletar amostras de treinamento para a classificação automática. Na fase final, o objetivo foi validar o mapa produzido.

Os materiais utilizados para o levantamento de campo foram: GPS, máquina fotográfica digital e imagens de satélite ALOS impressas. Para agilizar o levantamento de campo, foi elaborada uma planilha de campo, que pode ser observada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Modelo de planilha de campo.

PLANILHA DE CAMPO					
AMOSTRA DE TREINAMENTO DA CARACTERIZAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO					
CÓDIGO	COORDENADAS UTM (Previstas)		COORDENADAS UTM (Real)		Nºs DAS FOTOGRAFIAS
TIPO DE USO					
CLASSE			SUBCLASSE		
Observações:					

Em escritório, as amostras de treinamento foram acopladas ao *geodatabase* e utilizadas na escolha das “*ROIS*” (regiões de interesse) para a classificação automática e para a validação da classificação da imagem de satélite. Na Figura 6.13, nota-se o mapa de localização das amostras de treinamento.

Figura 6.13 - Localização das amostras de treinamento.

6.2.1.4 Delimitação/Detecção de alvos

Áreas urbanas, fragmentos florestais, atividades pontuais e solo exposto foram detectados e delimitados de forma analógica e manual, através de uma varredura na imagem, utilizando-se o software ArcGis10®.

Áreas de lago, vegetação natural, agricultura e pastagem foram detectadas lançando-se mão de técnicas de classificação automática.

Para a classificação da imagem, foram utilizados métodos supervisionados que se baseiam no uso de algoritmos para se determinar os “pixels” que representam valores de refletância característicos para uma determinada classe, o que justifica a seleção das regiões de interesse que representam as classes de uso e ocupação.

Após definir os padrões de refletância (chave de classificação) dos tipos de uso avaliados, foram delimitadas regiões de interesse “ROIS” necessárias como dados de entrada na classificação automática. O objetivo desse procedimento foi efetuar o treinamento das ferramentas de classificação automática para que pudessem identificar os padrões de refletância de cada classe.

Foram testados os métodos de classificação automática: do paralelepípedo, da distância mínima da média, da rede neural e da máxima verossimilhança. Para classificação do lago, foi utilizado o método do paralelepípedo e, para as demais classes, foi utilizado o da máxima verossimilhança.

6.2.1.5 Refinamento dos resultados

Sobre o produto da classificação automática da imagem foram aplicados filtros para a retirada de ruídos da classificação e funções de aglutinação e separação de classes. Para tanto foram utilizados filtros e ferramentas de edição e refinamento manual e automático, como por exemplo: o “*classe edit*”, o “*clump*” e o “*sieve*”.

As classes obtidas, a partir da delimitação analógica e da classificação automática (refinada), foram sobrepostas, e a seguir, procedeu-se ao refinamento manual final no aplicativo “*classe edit*”.

6.2.1.6 Vetorização, quantificação e análise de resultados

A vetorização dos “layers” deu-se, lançando-se mão de uma função que cria polígonos de vetor (extensão “.evf”) em áreas classificadas. A seguir, os vetores de extensão “.evf” foram convertidos para extensão “.shp” de maneira a possibilitar a importação dos arquivos pelo software *ArcGis10*®.

As classes de uso e ocupação, uma vez inseridas no geodatabase do software *ArcGis10*®, foram quantificadas, utilizando-se ferramentas “Zonal”, possibilitando a caracterização e a classificação dos padrões de intervenção antrópica e a preservação ambiental relacionadas às principais formas de uso e ocupação dos compartimentos ambientais da região do Médio Rio Grande.

Para avaliação dos padrões de ocupação antrópica e de preservação ambiental da bacia, as análises foram divididas em dois momentos:

- No primeiro momento, efetuou-se a quantificação e a análise estatística dos percentuais de área que cada classe de uso e ocupação abrange na unidade em análise (GD7), nos municípios, nos macrocompartimentos, e nas unidades ambientais que compõem a área em estudo.
- Em um segundo momento, com base nas análises anteriores, efetuou-se a classificação das unidades ambientais com relação às atividades de uso e ocupação que predominam em cada unidade ambiental.

A partir dos resultados, procedeu-se à classificação das unidades ambientais, com relação à abrangência de cada classe de uso e ocupação nos compartimentos ambientais em análise.

Quando se efetua uma classificação, agrupam-se características semelhantes em classes, atribuindo-se o mesmo símbolo para cada membro da classe. Esse procedimento permite a identificação de padrões com maior facilidade.

No software *ArcGis10*®, há vários métodos estatísticos que possibilitam a divisão de uma população de dados em classes. Dentre eles pode-se destacar a divisão de classes por quantis, pelo desvio padrão, por intervalos geométricos e por quebras naturais.

Foram efetuados testes de classificação da população de valores, avaliada segundo os diferentes tipos de classificação e optou-se pela classificação segundo quebras naturais. O método de classificação selecionado é baseado no algoritmo de *Jenk's Natural Breaks*. Ele busca diferenças estatisticamente significativas entre os pares adjacentes aos dados; logo, é baseado em agrupamentos naturais inerentes à população de dados.

6.2.1.7 Critérios e peculiaridades da detecção e classificação de alvos

A expressão “uso da terra ou uso do solo” é entendida como sendo a forma pelo qual o espaço está sendo ocupado pelo homem. Conforme IBGE (2006), não existe um número de classes predeterminado, pois existem múltiplas possibilidades de arranjos espaciais que poderão se constituir em uma classe composta.

A seleção e ênfase dada a cada classe depende de características do local e dos objetivos do planejamento (SANTOS, 2004). Logo, a definição da legenda das classes, que deverão compor um mapa de uso e ocupação, não é um procedimento simples; há a possibilidade, para uma mesma escala, de haver diferentes propostas de classificação, com resultados que induzem a distintos prognósticos.

Considerando-se aspectos relativos às finalidades do estudo e às características da área, foram definidas 8 classes e 27 subclasses de uso e ocupação, as quais estão apresentadas no Quadro 6.2.

A classe área urbana está subdividida nas subclasses: centro urbano, expansão urbana, vazio urbano, distrito industrial e chacreamento. A subclasse centro urbano consiste em áreas urbanas, delimitadas a partir da imagem Landsat, datada de 1984, as quais atualmente constituem áreas urbanas bem consolidadas.

A subclasse expansão urbana é definida por áreas onde se identificou expansão urbana no intervalo entre 1984 e 2009. Essas áreas foram detectadas a partir da diferença (expansão) de áreas urbanas detectadas na imagem ALOS (2009) e na imagem Landsat5 (1984).

A subclasse vazio urbano é composta por áreas localizadas no interior das áreas classificadas como centro urbano, que não possuem ocupação antrópica consolidada e,

dessa forma, não cumprem sua função social, conforme o previsto no estatuto das cidades. A subclasse chacreamento engloba áreas com presença de chácaras cuja abrangência é significativa. A detecção dessa subclasse ocorreu com base no conhecimento de campo e pela proximidade, da maior parte dessas áreas, com as regiões marginais ao lago.

Quadro 6.2 - Classes e subclasses de uso e ocupação definidas para o estudo

Classes e subclasses de uso e ocupação e seus códigos identificadores			
Código	Classe	Código	Subclasse
1	Área urbana	1.1	Centro urbano
		1.2	Expansão urbana
		1.3	Vazio urbano
		1.4	Distrito industrial
		1.5	Chacreamento
2	Área agrícola	2.1	Cultura permanente
		2.2	Cultura anual
		2.3	Silvicultura
3	Pastagem	3.1	Pastagem
4	Estrada	4.1	Estrada rural
		4.2	Estrada municipal
		4.3	Estrada pavimentada
5	Solo Exposto	5.1	Solo Exposto
		5.2	Mineração
		5.3	Erosão
		5.4	Disposição de resíduos sólidos municipais
		5.5	Movimento de massa
6	Vegetação Natural	6.1	Mata
		6.2	Campo arbustivo
		6.3	Campo de Cerrado
7	Atividade Pontual	7.2	Aeroporto
		7.3	Subestação de energia
		7.4	Indústria
		7.5	Hidrelétrica
		7.6	PCH (Pequena Central Hidroelétrica)
8	Represa	8.1	Lago - Rio Grande
		8.2	Represa

A classe áreas agrícolas foi subdividida nas subclasses: cultura permanente, cultura anual e silvicultura. A subclasse cultura anual engloba áreas com plantio de cana,

milho, soja, sorgo e feijão. A subclasse cultura permanente corresponde a áreas de café e fruticultura.

A classe pastagem engloba pastagens limpas e pastagens com ocorrência de arbustos, envolvendo, geralmente, as atividades de pecuária bovina, tanto extensivas quanto intensivas.

A classe solo exposto abrange áreas de solo descoberto, subdivididas nas seguintes subclasses: mineração, movimento de massa, erosão, disposição de resíduos sólidos e solo exposto.

A classe vegetação natural subdivide-se nas subclasses: mata, campo e campo arbustivo. Vale ressaltar que as áreas de mata envolvem tanto matas do bioma Cerrado quanto matas semidecíduais do bioma Mata Atlântica.

A classe atividade pontual compreende atividades de pequena área de abrangência; contudo, sua localização e delimitação são consideradas relevantes do ponto de vista socioeconômico e ambiental. A classe em questão está dividida nas subclasses: aeroporto, subestação e energia, indústria, hidroelétrica e pequena central hidroelétrica.

6.2.1.8 Avaliação dos padrões de ocupação antrópica e preservação ambiental da região do Médio Rio Grande

No Apêndice C, encontra-se o mapa de uso e ocupação do solo da unidade de gerenciamento de recursos hídricos do CBH-GD7. Esse é um produto cartográfico básico indispensável para diagnósticos e prognósticos ligados a diversos tipos de problemas que têm relação com atividades antrópicas e que podem levar a problemas no gerenciamento dos recursos hídricos dos diversos compartimentos ambientais que compõem a área estudada.

A caracterização dos principais tipos de uso e ocupação do terreno é indispensável para o planejamento de ações de preservação, conservação e recuperação de paisagens presentes na área de estudo. Assim, o conhecimento detalhado da ocupação territorial é de fundamental importância para a garantia da sustentabilidade da região frente às questões de cunho socioeconômico e ambiental.

A Figura 6.14 mostra os percentuais que cada classe de uso e ocupação abrange na área em estudo. No Quadro 6.3 pode-se verificar o percentual de área e a abrangência de cada classe e subclasse de uso e ocupação na região do Médio Rio Grande.

Figura 6.14 - Área de abrangência, em termos de percentual de área, de cada classe de uso e ocupação na unidade de gerenciamento de recursos hídricos CBH-GD7.

Nota-se que há predominância de áreas com atividades agrícolas (33,4%), seguidas por áreas com presença de vegetação natural (32,63%) e regiões com atividades pecuárias (28,1%).

Em relação às áreas agrícolas, a classe de culturas anuais é a que possui maior de abrangência (23,78%), seguida pelas de culturas permanentes (8,11%).

As áreas de cultura anual referem-se principalmente aos plantios de cana e milho, além de soja, arroz, feijão, batata, sorgo e girassol, em menores proporções. Essas culturas localizam-se, predominantemente, em regiões de relevo plano a ondulado, as quais são favoráveis ao uso de máquinas agrícolas. Vale destacar que a parcela relacionada a áreas de relevo ondulado (maioria) demanda por medidas conservacionistas devido ao seu potencial de perda de solos e consequente alteração na qualidade de recursos hídricos superficiais.

Quadro 6.3 - Abrangência das classes e subclasses de uso e ocupação na unidade de gerenciamento de recursos hídricos CBH-GD7.

Código	Classe	Área (km²)	Área (%)	Código	Subclasse	Área (km²)	Área (%)
1	Urbana	69,37	0,71	1.1	Centro Urbano	25,67	0,26
				1.2	Expansão urbana	29,63	0,30
				1.3	Vazio urbano	0,50	0,01
				1.4	Distrito industrial	2,21	0,02
				1.5	Chacreamento	11,37	0,12
2	Agricultura	3274,39	33,43	2.1	Cultura permanente	794,79	8,11
				2.2	Cultura anual	2328,58	23,78
				2.3	Silvicultura	151,02	1,54
3	Pecuária	2755,56	28,13	3.1	Pastagem	2755,56	28,13
4	Estrada	159,79	1,63	4.1	Estrada rural	79,39	0,81
				4.2	Estrada municipal	73,11	0,75
				4.3	Estrada pavimentada	7,28	0,07
5	Solo exposto	27,44	0,28	5.1	Solo exposto	14,67	0,15
				5.2	Mineração	8,49	0,09
				5.3	Erosão	3,60	0,04
				5.4	Disposição de resíduos sólidos	0,66	0,01
				5.5	Movimento de massa	0,02	0,00
6	Vegetação natural	3195,96	32,63	6.1	Mata	1765,71	18,03
				6.2	Capoeira	19,14	0,20
				6.3	Campo	1411,11	14,41
7	Atividade pontual	3,96	0,04	7.2	Aeroporto	1,29	0,01
				7.3	Sub-estação de grande porte	0,23	0,00
				7.4	Indústria (atacadista, alimentícia, química e metalúrgica)	1,84	0,02
				7.5	Hidroelétrica	0,57	0,01
				7.6	Pequena Central Hidroelétrica	0,03	0,00
8	Represa	307,65	3,14	8.1	Barramento	13,59	0,14
				8.2	Lago	294,06	3,00

A subclasse cultura permanente refere-se, sobretudo, às áreas com plantio de café. Em menores proporções, essa subclasse também representa áreas de fruticultura, com produção de banana (com ocorrência localizada em áreas de baixa altitude nos municípios de Delfinópolis e São João Batista do Glória) e laranja (com ocorrência localizada no município de São Sebastião do Paraíso).

Na porção oeste da região do Médio Rio Grande, mais especificamente nas cabeceiras de bacias (faixa altimétrica entre 950 e 1200 metros), onde há ocorrência de rochas basálticas e arenitos, localiza-se a maior parte das áreas com plantio de culturas

permanentes (cafeicultura). Além disso, nota-se a concentração dessas culturas na porção sul da área estudada, em regiões de cabeceira das bacias dos rios Conquista (macrounidade MB_m[15](6)) e São João (macrounidade MB_m[13](8)), as quais são áreas com alta energia de relevo e que demandam por práticas conservacionistas do solo.

Com relação à atividade de silvicultura, há principalmente plantios de eucalipto e pinus. Os plantios de eucalipto encontram-se fragmentados e bem distribuídos à esquerda da margem do lago. Notam-se apenas dois pontos onde os plantios de silviculturas ocorrem de maneira aglomerada, nas proximidades da fábrica de cimentos Itaú (eucalipto) e no extremo norte da região do Médio Rio Grande (pinus).

As áreas de pastagens limpas ou com ocorrência de arbustos, para fins de pecuária extensiva e intensiva, envolvem a maior parte da área de estudo, abrangendo aproximadamente 2755,56km² (28,1% da área). Esse tipo de uso está distribuído aleatoriamente, principalmente em regiões à esquerda da margem do lago. As áreas de pastagem, que se encontram à direita da margem do lago, estão distribuídas em regiões de baixa altitude e/ou baixa energia de relevo.

As áreas de vegetação natural envolvem regiões preservadas com ocorrência de fitofisionomias pertencentes aos biomas de Cerrado e Mata Atlântica. Conforme se pode observar na Figura 5.4, as fitofisionomias do bioma Cerrado são do tipo Campo (limpo e sujo), Campo Cerrado, Campo Rupestre e Cerrado Senso Stricto. Já com relação ao bioma Mata Atlântica, há ocorrência de Floresta Estacional Semidecidual Montana.

Com análise do gráfico (Figura 5.5), pode-se perceber que há predomínio de Floresta Estacional Semidecidual Montana, Campo Rupestre e Campo (limpo e sujo). Percebe-se que a variação das fitofisionomias é função de tipos de solo (profundidade e predomínio textural), de características microclimáticas e de variações no relevo (altimetria e declividade). Nessa área, pode-se notar que há manchas de transição, de difícil identificação e separação, entre os biomas. Assim, na fase de mapeamento, optou-se por uma classificação que não faz distinção entre tais tipologias vegetais.

No mapa de uso e ocupação, as áreas classificadas como mata envolvem, em sua maior parte, a fitofisionomia tipo Floresta Estacional Semidecidual Montana e, em

algumas áreas, trata-se de áreas de Cerrado com vegetação mais adensada e áreas de transição entre o cerrado e a mata atlântica (regiões ecótonos).

As classes de campo envolvem, em sua maior parte, vegetações do tipo Campo Rupestre e Campo (limpo e sujo) e, em menores proporções, Campo Cerrado.

As áreas de mata e campo mapeadas perfazem cerca de 1766km² e 1411km², respectivamente, o que corresponde a 18% e 14,4% da região do Médio Rio Grande.

Percebe-se que o maior percentual em área de vegetação natural refere-se às matas, ao contrário do que é constatado no inventário florestal de Minas Gerais. Essa diferença é justificada pela escala do trabalho, mais detalhada, que permite a identificação de muitos fragmentos de mata (de pequena área de abrangência) que não foram identificados no referido inventário.

O maior percentual de área de vegetação natural refere-se à Floresta Estacional Semidecidual Montana que é distribuída de forma fragmentada ao longo de toda a área de estudo, principalmente nas regiões à esquerda da margem do lago. Esse tipo de vegetação predomina, de forma mais concentrada (com maiores áreas de abrangência) associado aos relevos fortemente inclinados a muito íngremes, e de forma bem fragmentada (com menores áreas de abrangência) associado às margens de cursos d'água onde, em ambos os casos, retarda o escoamento superficial e aumenta as taxas de infiltração e evapotranspiração e contribui para a redução de taxas de sedimentação e de cargas de poluição difusa para cursos d'água.

O Campo Rupestre ocorre de forma concentrada, em uma expressiva área de elevadas altitudes na região da Serra da Canastra e suas adjacências. A ocorrência da fitofisionomia Campo (limpo ou sujo) também se dá de forma agrupada em áreas significativas, localizadas principalmente em relevos montanhosos cujos solos são arenosos e rasos e, em algumas regiões escarpadas e de morros, com solos predominantemente rasos e siltosos.

A classe represa engloba o lago e barramentos. O lago consiste em dois reservatórios artificiais com vazão regularizada pela hidrelétrica de Furnas. As áreas com barramentos estão aleatoriamente distribuídas na região à esquerda do lago.

A área de lago consiste em um importante elemento regional, tanto em termos de seu potencial hidrelétrico, quanto turístico e de disponibilidade hídrica para os demais múltiplos tipos de uso desse recurso.

Tais reservatórios contribuem para a regularização da vazão de corpos hídricos superficiais e, conseqüentemente, permitem um controle maior da disponibilidade hídrica no período seco e a redução de picos de cheia em períodos chuvosos. Apesar disso, esse tipo de ocupação leva a alterações sobre o ambiente, tendo em vista a interferência que exerce sobre o regime de escoamento, as alterações no terreno na fase de construção com a retirada de matas ciliares e a remobilização do solo.

A barragem da hidrelétrica de Furnas fica a montante (município de São José da Barra), regulariza as vazões de entrada na porção média do Rio Grande. A jusante desse barramento, fica o reservatório da usina Marechal Mascarenhas de Moraes (localizada no município de Ibiraci), o qual compreende a maior parte da classe lago, cerca de 256km² (2,6% da área de estudo). A jusante da usina Marechal Mascarenhas de Moraes, está o reservatório da hidrelétrica de Luís Carlos Barreto (localizado em Pedregulho, já na porção baixa do Rio Grande). Esse reservatório perfaz uma área de 33,9km², o que corresponde a 0,4% da GD7.

Há uma significativa parcela das áreas urbanas que corresponde a chacreamentos (16% das áreas urbanas), os quais, em sua maior parte, estão distribuídos de forma fragmentada nas margens do lago. Esses dados contribuem para reafirmar o potencial turístico da região devido à presença dos grandes reservatórios artificiais. Contudo, a atividade turística nessas áreas demanda uma atenção quanto a aspectos de preservação ambiental devido ao seu potencial de impacto sobre a qualidade dos recursos hídricos em questão.

As áreas urbanas envolvem 69,4km², o que corresponde a 0,7% da GD7. Apesar da abrangência (relativamente pequena), essas ocupações são consideradas "hot spots", pontos que têm um expressivo potencial de impacto ambiental. A maior parte (43%) corresponde à subclasse de expansão urbana (de 1984 a 2009) e às regiões de centro urbano (37% das áreas urbanas).

A expansão de áreas urbanizadas leva a um expressivo aumento do escoamento superficial e à redução de taxas de infiltração de água, o que contribui para elevação dos picos de cheia e redução do tempo de concentração de águas na bacia. Além disso, gera expressivas demandas sobre os recursos hídricos tanto em termos de quantidade (relacionada ao consumo humano) quanto em termos de qualidade (relacionada a pontos de lançamento de efluentes e a poluição difusa).

As áreas urbanas dos municípios de Passos e São Sebastião do Paraíso têm maior abrangência, respectivamente com 21km² e 16km² (Figura 6.15 - a). Com relação à expansão urbana, os municípios de Sacramento, Monte Santo de Minas, Nova Resende e São José da Barra foram os que apresentaram os maiores níveis relativos de crescimento, no período avaliado. São Roque de Minas praticamente não apresenta áreas urbanas inseridas na região estudada.

Entre as atividades pontuais, as indústrias, na maioria dos casos, possuem um elevado potencial de impacto sobre o meio ambiente e os recursos hídricos. Os principais setores relativos às indústrias identificadas foram: atacadistas, alimentícias, químicas, metalúrgicas.

No setor alimentício, as principais tipologias de indústrias são: de torrefação e moagem de café, laticínios, formulação de ração, granjas, frigoríficos e fabricação e refinação de açúcar, álcool, fermentos e leveduras. Já as indústrias químicas envolvem fabricação de cimento e concreto, confecções de vestuário e calçados, curtumes, fábricas de sal mineral, entre outros.

O setor atacadista abarca o armazenamento e comércio de combustíveis, café, fertilizantes e grãos. As principais metalúrgicas envolvem beneficiamento de minerais não metálicos, serralherias, fabricação de telhas e tijolos, fabricação de estruturas metálicas e artefatos de ferro, aço e metais não ferrosos e de cobre, fabricação de peças, entre outros.

Os únicos municípios que apresentam distritos industriais são Passos e Itaú de Minas. A maior abrangência das atividades industriais foi identificada nos municípios de Passos e São Sebastião do Paraíso. Contudo, quando se relaciona as áreas industriais com o total de áreas urbanas e de atividades pontuais de cada município, pode-se

verificar que os municípios de Fortaleza de Minas e Itau de Minas apresentam uma parcela de área significativa de indústrias em relação às outras atividades, cerca de 32% e 29%, respectivamente (Figura 6.15 - b).

Figura 6.15 - Área de abrangência das áreas urbanas e atividades pontuais por município e a distribuição dos percentuais de cada subclasse de áreas urbanas e atividades pontuais do total dessas áreas por município (b).

Ao todo foram identificados 7 aeroportos de pequeno porte localizados nos municípios de Ibiraci, São José da Barra, Passos, São Sebastião do Paraíso, Itaú de Minas, Bom Jesus da Penha e Monte Santo de Minas.

Além das 2 grandes centrais hidrelétricas supracitadas, foram cadastradas três pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) localizadas na bacia do rio São João (macrounidade MB_m[13](8)), nos municípios de Pratápolis, Itaú de Minas e Nova Resende.

A classe de solo exposto representa cenários de solo descoberto por incidência de processos erosivos, atividades de mineração (extração), disposição de resíduos sólidos, dentre outras. Apesar de sua pequena área de abrangência, cerca de 0,28% da área da região de estudo (27,44km²), esse tipo de atividade pontual apresenta considerável potencialidade de impacto sobre o meio. Assim, podem ser considerados como pontos em que se devem adotar medidas de recuperação, controle e prevenção sobre seus impactos potenciais e/ou existentes.

As atividades minerárias englobam a extração de quartzito, brita, areia, cascalho, argila, xisto, calcário, níquel e gnaiss. Os pontos cadastrados como erosões incluem processos erosivos lineares (ravinas e boçorocas). Quanto à disposição de resíduos sólidos, foram cadastrados somente lixões, aterros sanitários e controlados destinados ao acondicionamento de resíduos urbanos.

A classe estrada representa:

- rodovias federais e estaduais asfaltadas (subclasse de estradas pavimentadas);
- estradas de terra que ligam municípios a outros municípios, bairros rurais e a chacreamentos (subclasse de estradas municipais); e
- estradas rurais que são geralmente mais estreitas que as municipais e que usualmente interligam as estradas municipais às propriedades rurais.

As estradas constituem regiões que podem levar a fluxos concentrados de escoamento superficial e, conseqüentemente, a diversos impactos sobre o meio. Contudo, do ponto de vista socioeconômico, são importantes para o fluxo de produtos e acesso a diferentes localidades.

6.2.1.8.1 Padrões de uso e ocupação por município

Os parâmetros relativos ao percentual de área e à abrangência de atividades agrícolas e vegetação natural por município são expostos na Figura 6.16.

Nota-se a predominância de ocupação por vegetação natural nos municípios de São Roque de Minas, São João Batista do Glória, Delfinópolis e Sacramento. Nesses casos, prevalecem as formações campestres.

As matas ocorrem de forma distribuída, em todos os municípios, com níveis de percentual de área ocupada variando na faixa entre 10 e 27%. Fortaleza de Minas, Alpinópolis, Itaú de Minas apresentam os maiores percentuais de área ocupada por matas. Em São Tomás de Aquino, São Pedro da União, Itaú de Minas, Itamogi, Cássia, Capetinga e Bom Jesus da Penha praticamente não ocorrem vegetações campestres.

Os municípios de São Tomás de Aquino, Itamogi, Cássia, São Pedro da União, Monte Santo de Minas e Nova Resende apresentam um nível preocupante (inferior a 20%) de ocupação por áreas preservadas.

Itamogi, São Tomás de Aquino e Nova Resende são os municípios que têm maior incidência (em termos percentuais) de culturas permanentes; já São Sebastião do Paraíso tem a maior abrangência (133,8km²). A silvicultura é notável em Itaú de Minas e Sacramento; nos demais municípios, essa atividade tem baixos níveis de ocorrência (entre 0,5% e 2%).

As atividades relativas às culturas anuais detêm expressiva ocupação territorial em todos os municípios (com exceção de São Roque de Minas, onde não ocorre esse tipo de atividade). Delfinópolis e Fortaleza de Minas têm menor incidência, respectivamente com 16% e 18,5% de área ocupada. Em Passos há uma maior área de abrangência, cerca de 454km²; em termos relativos pode-se destacar os municípios de Claraval (33%), Passos (34%) e São José da Barra (34,5%).

Figura 6.16 - Percentual de área ocupada por áreas agrícolas e de vegetação natural (a) e a área de abrangência de cada subclasse relativa a tais atividades (b).

6.2.1.8.2 Padrões de uso e ocupação por macrounidade ambiental

A Figura 6.17 apresenta parâmetros relativos à distribuição, em termos de percentual de área (%) e área de abrangência (km²), de atividades agrícolas e vegetação natural em cada macrounidade ambiental.

Figura 6.17 - Percentual de ocupação nas macrounidades ambientais por: áreas agrícolas, áreas com vegetação natural e lago.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Algumas macrounidades têm padrões de ocupação bem heterogêneos, outras possuem alguns tipos uso e ocupação predominantes sobre outros. Na maioria das macrounidades, as culturas anuais, pastagens e matas estão presentes de forma bem distribuída. Já as áreas de campo, silvicultura, e cultura permanente apresentam concentrações.

As formações campestres concentram-se principalmente nas macrounidades MB_m[04](6), MB_m[03](6), MB_m[01](5), MB_m[05](5), onde há significativa preservação ambiental.

A macrounidades MB_m[04](6) têm níveis de preservação elevados; em torno de 93% de suas áreas são preservadas e 80% de suas áreas têm a vegetação do tipo campo. Nota-se um predomínio de áreas preservadas em relação a outras atividades nas unidades MB_m[03](6), MB_m[01](5), MB_m[05](5), MB_m[07](5), MGU_m[30], MB_m[06](5).

As atividades agropecuárias têm uma expressiva ocupação nas macrounidades: MGU_b[20](4), MGU_m[25], MB_b[19](6), MB_m[11](5), MGU_b[21](4) e MB_b[18](5). Como consequência das atividades agropecuárias intensivas, esses compartimentos apresentam níveis preocupantes de preservação; seus percentuais de área ocupada por vegetação natural variam entre 13 e 17%.

A silvicultura tem ocorrência reunida nas macrounidades: MB_m[06](5) e MGU_m[31]. Já as culturas permanentes concentram-se nas macrounidades: MGU_b[20](4), MB_b[18](5), MB_b[19](6), MB_m[10](5) e MGU_b[21](4).

6.2.1.8.3 Padrões de uso e ocupação por unidade ambiental

A partir de uma análise estatística de agrupamentos realizadas sobre resultados de percentual de área ocupada por tipo de uso e ocupação em cada unidade ambiental. Essa análise permitiu discretizar grupos de unidades ambientais com diferentes padrões de ocupação territorial.

O Quadro 6.4 indica os intervalos de classe de cada nível de agrupamento referentes a cada tipo de uso analisado.

Quadro 6.4 - Intervalos de classe definidos através da análise de agrupamentos, para classificação das unidades ambientais quanto aos seus níveis de ocupação dos tipos de uso analisados.

Tipo de uso analisado	Não Classif.	Nível de ocupação				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	Intervalo de classe (%)					
Urbana	0	0 a 0,84	0,84 a 2,56	2,56 a 7,54	7,54 a 22,05	22,05 a 41,58
Agrícola	0	0 a 40,50	40,50 a 62,07	62,07 a 73,57	73,57 a 79,69	79,69 a 91,19
Pecuária	0	0 a 13,29	13,29 a 26,77	26,77 a 37,51	37,51 a 49,86	49,86 a 68,22
Vegetação natural	0	5,87 a 20,23	20,23 a 32,87	32,87 a 53,57	53,57 a 80,16	80,16 a 99,96
Cultura Permanente	0	0 a 4,22	4,22 a 11,53	11,53 a 19,63	19,63 a 30,60	30,60 a 48,57
Cultura anual	0	0 a 9,61	9,61 a 19,64	19,64 a 30,81	30,81 a 44,98	44,98 a 70,34
Silvicultura	0	0 a 0,19	0,19 a 0,81	0,81 a 2,79	2,79 a 9,18	9,18 a 29,75
Pastagem	0	0 a 17,09	17,09 a 29,56	29,56 a 38,66	38,66 a 51,13	51,13 a 68,22
Mineração	0	0 a 0,02	0,02 a 0,07	0,07 a 0,28	0,28 a 1,01	1,01 a 3,56
Erosão, movimento de massa, solo exposto	0	0 a 0,09	0,09 a 0,19	0,19 a 0,39	0,39 a 0,71	0,71 a 1,51
Disposição de resíduos sólidos	0	0 a 0,01	0,01 a 0,03	0,03 a 0,06	0,06 a 0,09	0,09 a 0,58
Indústria	0	0 a 0,03	0,03 a 0,09	0,09 a 0,26	0,26 a 0,37	0,37 a 0,77
Mata	0	4,49 a 12,55	12,55 a 18,28	18,28 a 24,17	24,17 a 30,65	30,65 a 44,25
Campo	0	0 a 0,12	0,12 a 0,14	0,14 a 0,26	0,26 a 0,99	0,99 a 5,39
Barramento	0	0 a 0,08	0,08 a 0,10	0,10 a 0,17	0,17 a 0,46	0,46 a 1,50
Estrada	0	0,04 a 0,81	0,81 a 1,47	1,47 a 2,01	2,01 a 2,66	2,66 a 3,91

Nas Figuras 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 são mostrados os mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de ocupação por classes e/ou subclasses de uso e ocupação.

Vale destacar que o tipo de classe e/ou subclasse pode não ocorrer em todos os compartimentos analisados. Nesses casos, as unidades ambientais não foram classificadas e aparecem em branco nos mapas. Assim, a coloração branca indica ausência do tipo de ocupação analisado.

Figura 6.18 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: áreas urbanas (a), áreas agrícolas (b), pecuária (c) e vegetação natural (d).

Figura 6.19 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: cultura permanente (a), cultura anual (b), silvicultura (c) e pastagem (d).

Figura 6.20 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: mineração (a), erosão, movimento de massa e solo exposto (b), disposição de resíduos sólidos (c) e indústria (d).

Figura 6.21 - Mapas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de percentual de área ocupada por: mata (a), campo (b), barramento (c) e estrada (d).

Com base nos intervalos de classe, obtidos na análise anterior, e com a finalidade de distinguir grupos de unidades ambientais com padrões de ocupação antrópica e preservação ambiental, essas unidades territoriais foram classificadas quanto às atividades de uso e ocupação predominantes segundo três eixos temáticos: urbanização, preservação e agropecuária.

A Figura 6.22 mostra o mapa de classificação das unidades ambientais quanto à ocorrência de áreas urbanizadas. Os intervalos de classe definidos para essa classificação são mostrados no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 - Intervalos de classes definidos para classificação das unidades ambientais com relação às áreas urbanas.

Percentual de área	Código	Classe
20-50	2	Unidade com nível muito alto de urbanização
5-20	3	Unidade com alto nível de urbanização
0-5	4	Unidade mediamente urbanizada
0	5	Unidade sem presença de áreas urbanas

Figura 6.22 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de urbanização.

As classes definidas para carta de classificação das unidades, quanto à preservação ambiental, constam no Quadro 6.6. A carta de classificação das unidades é exposta na Figura 6.23.

Quadro 6.6 - Intervalos de classe definidos para classificação das unidades ambientais em relação à preservação ambiental

Percentual de área	Classe 1	Código	Classe 2
> 80	Unidade com alto nível de preservação	1.2	Unidade com alto nível de preservação com predomínio de campo
50-80	Unidade Preservada	2.1	Unidade preservada com predomínio de mata
		2.2	Unidade preservada com predomínio de campo
20-50	Unidade com nível aceitável de preservação	3.1	Unidade com nível aceitável de preservação com predomínio de mata
		3.2	Unidade com nível aceitável de preservação com predomínio de campo
6 - 20	Unidade com baixo nível de preservação	4.1	Unidade com baixo nível de preservação e predomínio de mata

Figura 6.23 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto à preservação.

No Quadro 6.7 podem-se observar os intervalos de classes definidos para classificação de atividades produtivas relacionadas à pecuária e à agricultura. Na Figura 6.24 é apresentado o mapa de classificação das unidades ambientais com relação aos níveis de ocupação por atividades agropecuárias.

Quadro 6.7 - Intervalos de classes definidos para classificação das unidades ambientais com relação aos seus níveis de ocupação por atividades agropecuárias.

% Área agrop.	Classe 1	Código	Classe 2	Classe 3
> 80	Unidades com alto nível de produção agropecuária	1.1.1	Unidades com alto nível de produção agropecuária, com predomínio de pecuária	
		1.2.1	Unidades com alto nível de produção agropecuária, com predomínio de agricultura	Unidades com alto nível de produção, com predomínio de agricultura - predomínio de cafeicultura em relação às outras culturas
		1.2.2		Unidades com alto nível de produção, com predomínio de agricultura - predomínio de culturas anuais em relação às outras culturas
50-80	Unidade com predomínio de produção agropecuária	2.1.1	Unidade com predomínio de atividades produtivas com predomínio de pecuária	
		2.2.1	Unidade com predomínio de produção agropecuária com predomínio de agricultura	Unidade com predomínio de produção agropecuária, com predomínio de agricultura - predomínio de cafeicultura em relação às outras culturas
		2.2.2		Unidade com predomínio de produção agropecuária, com predomínio de agricultura - predomínio de culturas anuais em relação às outras culturas
		2.2.3		Unidade com predomínio de produção agropecuária, com predomínio de agricultura - predomínio de silvicultura em relação às outras culturas
< 50	Unidade sem predomínio de produção agropecuária	3.1.1	Unidade sem predomínio de produção agropecuária, com predomínio de pecuária	
		3.2.1	Unidade sem predomínio de atividades produtivas com predomínio de agricultura em relação à pecuária	Unidade sem predomínio de produção agropecuária - predomínio de cafeicultura em relação às outras culturas
		3.2.2		Unidade sem predomínio de produção agropecuária - predomínio de culturas anuais em relação às outras culturas
		3.2.3		Unidade sem predomínio de produção agropecuária - predomínio de silvicultura em relação às outras culturas
0	Unidade sem atividades agropecuárias			

Figura 6.24 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto a atividades agropecuárias.

Com objetivo de sintetizar todas as análises realizadas em etapas anteriores e classificar as unidades ambientais com relação as suas atividades de ocorrência significativa, elaborou-se a carta de classificação das unidades ambientais em relação às atividades predominantes.

O Quadro 6.8 apresenta critérios definidos para classificação das unidades ambientais quanto as suas atividades predominantes, e a Figura 6.25 expõe o produto da classificação.

Na maior parte das unidades, há predominância de atividades agropecuárias, relacionadas com pecuária e culturas anuais. Nas unidades com predominância de áreas preservadas, geralmente as formações campestres dominam em relação às matas.

Há uma nítida divisão entre as regiões com unidades preservadas e agropecuárias. A maioria das unidades localizadas à esquerda da margem do lago são agropecuárias, ao passo que as preservadas estão à direita, na porção nordeste da área de estudo, região da Serra da Canastra.

As unidades ambientais localizadas na região das serras de Fortaleza e da Ventania e nas proximidades do lago a jusante da usina hidrelétrica Marechal Mascarenhas de Moraes também possuem áreas predominantemente preservadas.

Quadro 6.8 - Intervalos de classe definidos para classificação das unidades ambientais com relação às atividades predominantes de uso e ocupação do terreno.

Percentual de área	Código	Classe
20-50 áreas urbanas	1	Unidade nível alto de urbanização
> 80 áreas de vegetação natural	2.1.1	Unidade com alto nível de preservação, com predomínio de mata
	2.1.2	Unidade com alto nível de preservação, com predomínio de campo
50-80 áreas de vegetação natural	2.2.1	Unidade Preservada, com predomínio de mata
	2.2.2	Unidade Preservada, com predomínio de campo
> 80 de áreas produtivas com predomínio de pecuária em relação à agricultura	3.1.1.1	Unidades com alto nível de produção, com predomínio de pecuária
> 80 de áreas produtivas com predomínio de agricultura em relação à pecuária	3.1.2.1	Unidades com alto nível de produção, com predomínio de agricultura em relação à pecuária, com predomínio de cafeicultura em relação às outras culturas
	3.1.2.2	Unidades com alto nível de produção, com predomínio de agricultura em relação à pecuária com predomínio de culturas anuais em relação às outras culturas
50-80 de áreas produtivas com predomínio de pecuária em relação à agricultura	3.2.1.1	Unidades com predomínio de atividades produtivas, com predomínio de pecuária em relação a agricultura
50-80 de áreas produtivas com predomínio de agricultura em relação à pecuária	3.2.2.1	Unidade com predomínio de atividades produtivas, com predomínio de agricultura em relação à pecuária, com predomínio de cafeicultura em relação às outras culturas
	3.2.2.2	Unidade com predomínio de atividades produtivas, com predomínio de agricultura em relação à pecuária, com predomínio de culturas anuais em relação às outras culturas
	3.2.2.3	Unidade com predomínio de atividades produtivas, com predomínio de agricultura em relação à pecuária, com predomínio de silvicultura em relação às outras culturas
Não há atividade predominante	4	Unidade mista

Figura 6.25 - Mapa de classificação das unidades ambientais quanto às atividades predominantes de uso e ocupação no terreno.

6.2.2 Clima

O Fluxograma de etapas metodológicas, adotadas na caracterização climática, consta na Figura 6.26.

Figura 6.26 - Fluxograma síntese das principais etapas metodológicas da caracterização climática.

As principais etapas da análise de padrões climáticos envolveram:

- a aquisição e a análise de mensurações pontuais, incluindo: levantamento, processamento e regionalização de dados climatológicos pontuais;
- a mensuração indireta regional e instantânea de parâmetros associados ao fluxo energético, a partir de imagens de satélite, pela aplicação do modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), conforme propõe Allen (2002); e

- a modelagem física, da potencialidade regional e sazonal, da intensidade e do período de duração da radiação.

Os principais resultados obtidos foram mapas sazonais de:

- pluviosidade,
- temperatura,
- evapotranspiração potencial,
- evapotranspiração horária e
- radiação global sazonal.

Nos tópicos a seguir, são apresentados os aspectos metodológicos da análise de padrões climáticos da unidade de gerenciamento de recursos hídricos do CBH-GD7.

6.2.2.1 Inventário de estações climatológicas, levantamento de dados e estruturação do banco de dados

Nesta fase, buscou-se verificar a situação do monitoramento climatológico da bacia, visando à elaboração, na etapa seguinte, de modelos de distribuição espaço-temporal de padrões climáticos da GD7.

Assim, efetuou-se o levantamento de dados de monitoramento e a caracterização de cada estação de monitoramento climático, que já operou e que está operando, no interior e nas adjacências da área de estudo.

O levantamento de dados incluiu as seguintes instituições fontes de dados:

- ANA – Agência Nacional de Águas
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- FCE – Furnas Centrais Elétricas
- COOXUPÉ – Cooperativa de Cafeicultores de Guaxupé
- COOPARAÍSO – Cooperativa de Cafeicultores de São Sebastião do Paraíso
- VOTORANTIN

Para a caracterização das estações climatológicas, foi elaborada uma planilha na qual foram inseridas as seguintes informações:

- Código da ANA
- Nome da estação
- Fonte de dados de monitoramento
- Situação – em operação (O) ou fora de operação (FO)
- Operadora - Empresa ou órgão responsável pelo monitoramento
- Localização
- Tipologia dos dados de monitoramento
- Período de monitoramento e períodos com falhas no monitoramento

Com o objetivo de verificar a disposição espacial das estações com dados de monitoramento climatológico, a planilha de caracterização supracitada foi acoplada ao “*Geodatabase*” do software *ArcGis10*®. Logo, a distribuição e as características das estações climáticas puderam ser verificadas, conjuntamente.

Contíguo ao “*Geodatabase*” supracitado, foram inseridos planos de informação referentes à delimitação da área de estudo e de seus compartimentos ambientais, à rede de drenagem e ao modelo digital de elevação, obtido a partir da imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Esse procedimento permitiu, através de mapas de localização e caracterização das estações, a verificação das condições do monitoramento climático da GD7. A Figura 6.27 ilustra um exemplo de consulta ao “*Geodatabase*”. No Apêndice D consta o mapa de localização das estações climatológicas acompanhado da planilha de caracterização.

Figura 6.27 - Exemplo de consulta realizada ao banco de dados do levantamento e caracterização de estações de monitoramento com dados.

Durante a estruturação do banco de dados, foram organizadas planilhas com diferentes tipologias (primárias, secundárias, resumo), as quais envolveram alguns processamentos e análise de dados básicos. Segue abaixo, a descrição das características dos diferentes tipos de planilhas:

- Planilhas primárias - Planilhas com dados básicos fornecidos pelas fontes de informação, sem nenhum tipo de processamento.
- Planilhas secundárias, com dados de pluviosidade - consistem em planilhas com os dados de monitoramento de pluviosidade total diária, com os seguintes processamentos: levantamento de períodos com falha no monitoramento, levantamento de períodos com eventos de pluviosidade considerados extremos, cálculo de pluviosidade total, média e máxima por mês e por ano de monitoramento.

- Planilhas secundárias, com dados de temperatura - consistem em planilhas com dados de monitoramento de temperatura máxima, média e mínima diária, com os seguintes processamentos: levantamento de períodos com falha no monitoramento, cálculo da média das temperaturas máximas, mínimas e médias por mês e por ano.
- Planilhas resumo - consistem em planilhas que contêm dados, de uma variável "x" analisada, de todas as estações de monitoramento selecionadas para a análise em um intervalo "x" de tempo, já devidamente preparadas para a inserção no "Geodatabase" e disponibilização da informação para os gestores e usuários de recursos hídricos.

6.2.2.2 Análise dos dados de postos de monitoramento climatológico

6.2.2.2.1 Períodos de análise, critérios para descarte de períodos e de estações de monitoramento climático

Para a elaboração de mapas climáticos, as séries de registros históricos de monitoramento devem retratar o comportamento climático da bacia. Assim, faz-se necessária a determinação dos intervalos de tempo a serem analisados e do limite de falhas nos registros. Além disso, é imprescindível uma boa densidade e distribuição espacial de pontos de monitoramento climático.

Visando a modelagem de padrões climáticos, primeiramente estabeleceram-se critérios referentes aos:

- períodos a serem analisados e
- períodos a serem considerados falhos.

Com relação aos dados de temperatura, analisou-se apenas o intervalo de tempo entre 2000 e 2009. Com relação aos dados de pluviosidade, os intervalos de tempo analisados são os seguintes:

- 1980 a 2009;
- 1980 a 1989;

- 1990 a 1999 e
- 2000 a 2009.

Como critérios de descarte de estações climáticas e de períodos de monitoramento, foram feitas as seguintes considerações:

- as estações consideradas falhas possuem "falhas mensais" no monitoramento, superiores a 30% dos meses analisados, dentro do intervalo de tempo estabelecido para análise; e
- o mês considerado falho é aquele que possui mais de 20% de seus dias de monitoramento falhos.

Com os intervalos de tempo para as análises e critérios de descarte de estações climáticas estabelecidos, foram selecionadas as estações climáticas cujas séries históricas deveriam ser utilizadas na modelagem.

6.2.2.2.2 Análise de consistência e preenchimento de séries de pluviosidade e temperatura mensais e anuais

É comum a existência de falhas ou interrupções nos registros de monitoramento climatológico. Um requisito imprescindível para diversos estudos hidrológicos consiste no preenchimento de falhas de monitoramento.

O preenchimento de falhas é necessário para a homogeneização de informações no intervalo de análise. Devido à elevada variabilidade espaço-temporal da chuva, o preenchimento de períodos falhos é recomendado por Tucci (2001) apenas para séries históricas mensais ou anuais.

A análise das séries de monitoramento de pluviosidade total e de temperatura média, com frequência mensal e anual, procedeu-se inicialmente ao preenchimento de períodos considerados falhos.

Para Tucci (2001), os métodos mais utilizados para proceder ao preenchimento de falhas são: o método da ponderação regional, o método de regressão linear e o método de ponderação regional com base em regressões lineares.

Neste estudo, tendo em vista a distribuição espacial (não uniforme) e as características das estações climatológicas, optou-se pelo método de ponderação regional com base em regressões lineares.

O método de preenchimento de falhas de ponderação regional com base em regressões lineares ou método de regressões lineares múltiplas é uma combinação de dois métodos:

- de ponderação regional; e
- de regressão linear.

Nele são estabelecidas regressões lineares entre o posto, com dados a serem preenchidos, e cada um dos postos vizinhos, sendo necessários, no mínimo, 3 postos vizinhos. A partir de cada regressão linear, obtém-se um coeficiente de correlação entre as séries históricas analisadas. E, por fim, os coeficientes de correlação entre cada posto vizinho e o posto com dados a serem preenchidos são utilizados como fatores de peso na determinação do valor final a ser preenchido.

Vale destacar que, para a seleção dos postos de monitoramento pluviométrico a serem aplicados no preenchimento de falhas, os seguintes aspectos foram considerados:

- o coeficiente de correlação r^2 entre o posto a ser utilizado no preenchimento de falhas e o posto com dados a serem preenchidos deve ser igual ou superior a 0,7;
- a proximidade entre as estações utilizadas no preenchimento de falhas e o posto com dados a serem preenchidos, devem ser o mais próxima possível; e
- a diferença de altitude entre o posto com dados a serem preenchidos e os postos utilizados para o preenchimento de falhas não deve ter uma grande amplitude altimétrica (50m).

Após o preenchimento de falhas nas séries de registros climáticos, efetuou-se uma análise de consistência. O objetivo desse procedimento foi encontrar possíveis

erros nas séries mensais e anuais, tanto nos dados registrados quanto nos dados obtidos a partir do preenchimento das séries.

Para a avaliação da consistência das séries, efetuou-se basicamente a identificação de registros destoantes dos padrões regionais e sazonais. Os períodos em que se constatarem inconsistências foram descartados e as falhas resultantes foram preenchidas, a partir de procedimentos relativos a preenchimentos de falhas descritos acima.

6.2.2.2.3 Variáveis de pluviosidade e temperatura analisadas

Após o preenchimento de falhas e a análise de consistência das séries históricas, os dados de temperatura e pluviosidade foram processados e analisados. Como resultado, foram geradas planilhas síntese e gráficos para cada variável analisada.

Com relação à pluviosidade foram avaliados, para os intervalos de tempo estabelecidos, os seguintes parâmetros:

- altura pluviométrica total anual (média do período analisado);
- alturas pluviométricas totais mensais (média do período analisado);
- altura pluviométrica total do trimestre chuvoso (média do período analisado);
- altura pluviométrica total do trimestre seco (média do período analisado);
- altura pluviométrica total dos meses mais úmidos, que coincidem com as estações de primavera e verão (média do período analisado); e
- altura pluviométrica total dos meses mais secos, que coincidem com as estações de outono inverno (média do período analisado).

Com relação à temperatura, foram avaliados, para os seguintes intervalos de tempo estabelecidos, os parâmetros:

- temperatura média anual (média do período analisado);
- temperaturas médias mensais (média do período analisado);
- temperaturas mínimas médias anuais (média do período analisado);

- temperaturas mínimas médias mensais (média do período analisado);
- temperaturas máximas médias anuais (média do período analisado); e
- temperaturas máximas médias mensais (média do período analisado).

6.2.2.2.4 Análise de dados de chuvas intensas

A precipitação máxima é entendida como uma ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica.

Na caracterização de chuvas intensas, geralmente são utilizados dados de pluviógrafos. Contudo, na indisponibilidade desse tipo de dados pluviográficos, podem-se utilizar dados diários de precipitação.

Conforme Genovez e Zuffo (2003) pode-se aplicar o processo de desagregação da chuva para diferentes períodos de permanência, a partir de relações entre lâminas de precipitação em diferentes tempos de duração.

Na avaliação das chuvas intensas, foram efetivados tratamentos estatísticos sobre os dados, conforme as recomendações de Genovez e Zuffo (op. cit.). O tratamento deu-se pela organização da série temporal de chuvas máximas anuais, em cada estação estudada, pela aplicação da distribuição assintótica de extremos máximos, também denominada distribuição de Gumbel e, por fim, pela estimativa de valores potenciais, considerando-se períodos de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos.

A conversão das estimativas de chuvas intensas com períodos de duração de 24 horas para duração de 1 hora ou outras durações pode ser feita a partir do processo de desagregação da chuva utilizando-se relações como as apresentadas no Quadro 6.9.

Quadro 6.9 - Relação entre as alturas pluviométricas das chuvas de diferentes durações P_{t_1}/P_{t_2} (Fonte: Genovez e Zuffo, 2003).

T2 (min)	T1(mi n)	(a) Média LOBO/MAGNI	(b) Média DNOS	(c) Média SETZER	(d) USA/W.B	(e) DENVER	(f) USA 1	(g) USA 2
30	5		0,34		0,37	0,42		
	10	0,51	0,54		0,57	0,63		
	15	0,67	0,70	0,67	0,72	0,75		
	20	0,80	0,81			0,84		
	25	0,91	0,91			0,92		
60	5						0,29	0,28
	10	0,38	0,40		0,45		0,45	0,43
	15	0,50	0,52	0,53	0,57		0,57	0,54
	30	0,74	0,74	0,79	0,79		0,79	0,75
	120	1,22	1,27	1,18	1,25			
1440	60	0,51	0,42			0,435		
	360	0,78	0,72					
	480	0,82	0,78					
	600	0,85	0,82					
	720	0,88						

6.2.2.3 Regionalização de dados de pluviosidade e temperatura

Um dos principais ramos da pesquisa em hidrologia e climatologia consiste, atualmente, na geração de mapas que possam subsidiar a implantação de projetos agrícolas e ambientais por meio da análise e interpolação espacial, retratando a distribuição espacial de parâmetros climáticos (ÁVILA; MELLO e VIOLA, 2009).

Atualmente, técnicas estatísticas que não eram aplicadas devido à grande dificuldade de cálculos complexos e numerosos são facilmente resolvidas por meio de recursos oferecidos pelas geotecnologias.

Dentre as técnicas utilizadas para a regionalização de grandezas climáticas, vale destacar os métodos de interpolação matemática: inverso do quadrado da distância (IDW), krigagem, co-krigagem, modelos de regressão. Cada método de interpolação tem suas vantagens e desvantagens; dentre os métodos mais indicados para a regionalização climática, pode-se destacar o método da co-krigagem, que permite que seja utilizada uma variável secundária densamente amostrada para auxiliar na regionalização da variável primária.

Marcuzzo, Andrade e Melo (2011) estudaram detalhadamente os métodos de interpolação matemática; os dados pontuais de precipitação foram submetidos aos métodos de interpolação matemática IDW, krigagem, spline de tensão e topo-to-raster.

Para o estado do Mato Grosso, Marcuzzo, Andrade e Melo (op. cit.) concluíram que o método topo-to-raster, sem enforce (sem preenchimento de depressões), tanto para períodos secos quanto chuvosos, se apresentou mais vantajoso.

Neste trabalho, foram testados os seguintes métodos de interpolação matemática: krigagem, co-krigagem, topo-to-raster e IDW. Em função das características da região, da distribuição dos postos com informações climáticas e dos resultados obtidos nos testes, optou-se pelo método de interpolação topo-to-raster, sem enforce. Na Figura 6.28 pode-se notar a comparação entre os métodos de interpolação do teste de regionalização de uma das variáveis analisadas.

Figura 6.28 - Comparação, mostrando testes de interpolação, da variável precipitação total anual média entre 2000 e 2009. As ferramentas de interpolação utilizadas nos testes de regionalização dessa variável foram: IDW (a); Kriging (b), Natural Neighbor (c), Spline (d) e Topo to Raster (e).

Considerando os aspectos discutidos acima, para a regionalização de todos os parâmetros de pluviosidade e temperatura analisados, aplicou-se o método de interpolação topo-to-raster. Para cada intervalo de análise, obtiveram-se os seguintes modelos climáticos:

- altura pluviométrica total anual (média do período analisado);

- alturas pluviométricas totais mensais (média do período analisado);
- altura pluviométrica total do trimestre chuvoso (média do período analisado);
- altura pluviométrica total do trimestre seco (média do período analisado);
- altura pluviométrica total dos meses mais úmidos, que coincidem com as estações de primavera e verão (média do período analisado);
- altura pluviométrica total dos meses mais secos, que coincidem com as estações de outono e inverno;
- altura pluviométrica de chuvas máximas com períodos de duração de 24 horas e períodos de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos;
- temperatura média anual (média do período analisado) e
- temperaturas médias mensais (média do período analisado).

6.2.2.4 Modelagem da radiação solar a partir do MDEHC

A radiação solar (insolação) origina-se do sol, é modificada à medida que viaja através da atmosfera, é ainda mais modificada pela topografia e características de superfície e é interceptada na superfície terrestre, onde pode ser dividida nas componentes direta, difusa e refletida.

A variação da orientação, da elevação (inclinação e aspecto) e de sombras relacionadas às características topográficas afeta a quantidade de insolação recebida em diferentes regiões. Essa variabilidade leva a distintas quantidades de insolação recebida em diferentes locais. Além disso, o horário do dia e a época do ano também contribuem para variabilidade do microclima.

Nesta etapa, procurou-se avaliar a variação da intensidade da radiação solar na região estudada em função de características relacionadas ao relevo e à época do ano. Assim, elaboraram-se modelos mensais e anuais de radiação solar direta, difusa e global.

Utilizou-se a ferramenta "*Area Solar Radiation*" da extensão "*Spatial Analyst*" do software *ArcGis10*®, que viabilizou o mapeamento e a análise dos efeitos do sol sobre

a GD7, em períodos de tempo específicos, considerando-se aspectos relacionados aos efeitos atmosféricos, a latitude e altitude, a declividade e o aspecto, as mudanças diárias e sazonais do ângulo zenital e os efeitos de sombras relacionados à topografia.

6.2.2.5 Balanço energético de superfície e estimativa da evapotranspiração (instantâneos)

A compreensão dos sistemas naturais e das leis físicas que regem cada componente do ciclo hidrológico é de suma importância para o correto gerenciamento dos recursos hídricos.

Baldocchi e Meyers (1998) afirmam que as trocas de energia na interface vegetação-atmosfera que ocorrem por meio dos componentes do balanço de radiação e dos fluxos de calor sensível e latente à superfície são essenciais para uma modelagem climática e hidrológica.

Para medição de grandezas que envolvem o balanço energético, os equipamentos mais utilizados convencionalmente fornecem apenas leituras pontuais. Através de técnicas de sensoriamento remoto, a partir de imagens de satélite e MDE, é possível estimar parâmetros relacionados ao balanço de radiação.

Nesse contexto, vale destacar o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) que consiste em um algoritmo semi-empírico que promove a parametrização do balanço de energia e dos fluxos de calor à superfície, tomando-se por base alguns dados locais e medições espectrais de satélites (WELIGEOPALEGE, 2005).

No modelo SEBAL, a evapotranspiração é calculada a partir de imagens de satélite e de dados climatológicos por meio do balanço de energia à superfície. O fluxo de radiação na superfície (R_n) retrata a energia real disponível na superfície e é calculado a partir do equilíbrio entre os fluxos de entrada e saída de radiação (Figura 6.29).

Onde, segundo Allen (2002):

- a quantidade de radiação de ondas curtas ($RS_{\downarrow}$) que permanece disponível na superfície é uma função da superfície de albedo (α). Albedo à superfície é um coeficiente de reflexão definido como a razão entre o fluxo radiante refletido para o fluxo radiante incidente sobre o espectro solar. Ele é

calculado utilizando-se a informação de imagens de satélite em radiância espectral para cada banda de satélite;

- a radiação de ondas curtas de entrada ($R_{S\downarrow}$) é calculada usando a constante solar, o ângulo de incidência solar, a distância Terra-Sol relativa, e a transmissividade atmosférica computadorizada;
- a radiação de ondas longas de entrada ($R_{L\downarrow}$) é calculada usando-se a equação modificada de Stefan-Boltzmann com transmissividade atmosférica e a temperatura de superfície de referência selecionada;
- a radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$) é calculada usando-se a equação de Stefan-Boltzmann com a emissividade da superfície calculada e temperatura da superfície;
- as temperaturas de superfície são calculadas a partir de informações de imagens de satélite em radiância térmica;
- a emissividade (ϵ_0) é calculada como uma função do índice de vegetação; e
- o último termo da expressão $(1-\epsilon_0) R_{L\downarrow}$ representa a fração de radiação de ondas longas de entrada que se perdem a partir da superfície, devido à reflexão.

Figura 6.29 - Balanço de radiação da superfície(adaptado de Allen, 1998).

Nesse contexto, visando à elaboração de mapas instantâneos e sazonais de evapotranspiração, seguiram-se os procedimentos preconizados por ALLEN (2002).

As imagens usadas neste trabalho são produto do sensor TM do satélite Landsat5. Foram empregadas todas as bandas disponíveis; no Capítulo 6.2.1, apresentam-se suas principais características (resolução espectral e espacial).

O primeiro procedimento sobre as imagens foi o georreferenciamento, a seguir procedeu-se ao balanço energético.

No fluxograma da Figura 6.30, estão apresentados os principais procedimentos metodológicos do balanço de energia à superfície e da estimativa da evapotranspiração.

Figura 6.30 - Fluxograma representando os procedimentos metodológicos adotados para o balanço de energia à superfície.

Dentre os procedimentos matemáticos e computacionais desta etapa, podem-se citar:

- a) Calibração radiométrica de todas as bandas das imagens de satélite
- b) Cômputo da refletância de cada pixel de todas as bandas das imagens de satélite
- c) Cálculo do albedo planetário
- d) Cálculo da transmissividade atmosférica
- e) Cálculo do albedo de superfície
- f) Cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI)
- g) Cálculo do índice de vegetação ajustado por solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI)
- h) Cálculo do índice de área foliar (IAF)
- i) Cálculo da emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ϵ_{NB} considerando-se a emissividade no domínio da banda larga ϵ_0 .
- j) Cálculo da temperatura da superfície
- k) Cômputo da radiância de onda longa emitida
- l) Cômputo da radiação de onda longa emitida
- m) Cômputo da radiação de onda curta incidente
- n) Cômputo do saldo de radiação à superfície
- o) Cômputo do fluxo de calor no solo
- p) Cômputo do fluxo de calor sensível
- q) Cômputo do fluxo de calor latente
- r) Cálculo da evapotranspiração

Logo, a partir de imagens geradas pelo sensor TM do satélite Landsat5 e do MDE, primeiramente efetuou-se um balanço de energia à superfície e, a seguir, foram computados os fluxos de calor sensível, de calor latente e de calor no solo e a evapotranspiração horária.

Foram elaborados modelos, de todas as variáveis, para cada data e horário de aquisição de dados (Tabela 6.4).

Neste trabalho, optou-se pela apresentação dos resultados referentes aos seguintes parâmetros: albedo à superfície, temperatura de superfície, fluxo de calor no solo e evapotranspiração horária.

Os produtos apresentados constituem uma média dos valores computados, para cada data de aquisição das imagens. Conforme Iaho (2002), esse procedimento faz-se necessário para que sejam ponderadas variações ao longo do tempo, principalmente aquelas referentes à ocupação por atividades agrícolas anuais.

6.2.2.6 Evapotranspiração potencial (com base nos modelos de temperatura média mensal e anual) e análise integrada de dados climatológicos (BHC)

A distribuição espaço-temporal da evapotranspiração potencial foi estimada a partir dos modelos de temperatura média mensal e anual.

Para estimar a evapotranspiração potencial, utilizou-se o modelo matemático, proposto por Thornthwaite e Mather (1955), o qual permite obter esse parâmetro a partir somente de dados de temperatura média.

A análise integrada dos dados climáticos visou à avaliação espaço-temporal de aspectos climáticos, relacionados aos excedentes e às deficiências hídricas. Desse modo, a partir de modelos de evapotranspiração total mensal e pluviosidade total mensal, efetuou-se um balanço hidro-climatológico (BHC).

O BHC foi executado através de procedimentos matemático-computacionais, que lançaram mão dos modelos matemáticos e recomendações de Thornthwaite e Mather (1955), que são detalhadamente descritas por Vianello e Alves (1991).

Assim, efetuou-se um balanço entre entradas e saídas de água no sistema solo-planta, levando-se em conta a máxima capacidade de armazenamento de água pelo solo (CAD), e obteve-se a disponibilidade hídrica pelo cálculo da deficiência hídrica, do excedente hídrico, da retirada e reposição de água no solo.

A CAD varia em função do solo (textura e estrutura) e da vegetação (profundidade do sistema radicular), para fins de caracterização de aspectos climáticos. Autores como Sentelhas et al. (2003), Carvalho et al. (2005) e Sentelhas e Angelocci

(2009) recomendam a adoção de valores entre 75mm e 125mm. Para execução do BHC, neste estudo, considerou-se a CAD constante; o valor adotado foi de 100mm.

Assim, por meio do BHC, efetuou-se uma análise integrada de dados de pluviosidade e temperatura pela estimativa de valores médios mensais dos seguintes parâmetros:

- evaporação;
- evapotranspiração potencial;
- evapotranspiração real;
- excedente hídrico no solo;
- deficiência hídrica no solo;
- reposição de água no solo; e
- retirada de água no solo.

6.2.2.7 Análise de padrões climatológicos

6.2.2.7.1 Pluviosidade

A altura pluviométrica total anual (média entre 1980 e 2009) varia entre 1750 mm e 1372 mm, a média é de 1567 mm (Figura 6.31). Os menores índices pluviométricos ocorrem na porção sudeste e aumentam de forma gradual em direção às porções noroeste e sudoeste da área de estudo.

Os índices pluviométricos máximos, médios e mínimos das macrounidades ambientais e dos municípios constam nos gráficos da Figura 6.32.

Na média, as macrounidades MB_m[17](6), MGU_m[30], MB_m[10](5) expõem os maiores índices pluviométricos totais anuais. Já as macrounidades MB_m[15](6) e MB_m[16](6) apresentaram os menores índices. A maior variação entre máximas e mínimas ocorrem nas macrounidades MB_m[13](8), MGU_b[21](4) e MB_b[19](6).

Os municípios de Claraval, Ibiraci e Itamogi apresentam os maiores níveis de pluviosidade total anual, com média superior a 1680mm. São José da Barra e Alpinópolis

expõem os menores índices pluviométricos (média inferior a 1400mm). Os municípios de São João Batista do Glória, Passos, São Sebastião do Paraíso e Delfinópolis apresentaram a maior variação entre os índices pluviométricos totais anuais (em torno de 200mm).

Figura 6.31 - Mapa de altura pluviométrica total anual média do período entre 1980 e 2009.

Figura 6.32 - Gráficos de altura pluviométrica máxima, média e mínima total anual por macrounidade ambiental (a) e por município (b).

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Na Tabela 6.6 estão apresentados os resultados estatísticos (valores máximos, médios e mínimos) referentes aos índices pluviométricos na GD7, considerando-se todos os intervalos de análise.

O gráfico que evidencia a variação mensal da pluviosidade da região do Médio Rio Grande consta na Figura 6.33. As Figuras 6.34, 6.35, 6.36 e 6.37 apresentam os mapas de altura pluviométrica total mensal e total de períodos secos e chuvosos.

O regime pluviométrico da região do Médio Rio Grande apresenta sazonalidade anual com períodos úmidos e secos bem definidos. O trimestre chuvoso corresponde aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. O trimestre seco corresponde aos meses de junho, julho e agosto.

Os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro são os com maior incidência e magnitude de eventos chuvosos. Os demais meses têm alturas pluviométricas relativamente baixas; em média, a pluviosidade total mensal é abaixo de 100mm.

Conforme se pode notar nos mapas que representam as alturas pluviométricas totais anuais, totais do trimestre chuvoso e dos meses chuvosos, em ambos os intervalos de análise, as porções norte e sudoeste da bacia são relativamente mais úmidas que a região sudeste. Nos períodos secos, a porção sudoeste é relativamente mais úmida que a porção nordeste.

No trimestre chuvoso, a altura pluviométrica total varia entre 891 e 692mm, a média é de 796mm. Os totais pluviométricos do trimestre seco variam entre 55 e 77mm; na média, são 63mm. Do total de precipitação anual, cerca de 51% correspondem às contribuições pluviométricas do trimestre chuvoso e 4% às do trimestre seco.

Os meses de janeiro e dezembro são os que têm maior contribuição nos índices pluviométricos; na média, são de 281 e 312 mm, respectivamente. O mês mais seco é julho, com totais pluviométricos médios em torno de 17mm.

Tabela 6.6 - Alturas pluviométricas máxima, mínima e média da bacia com diferentes períodos de análise.

Altura pluviométrica	Máxima (mm)	Mínima (mm)	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
Total anual	1751	1373	1567	96
Total dos meses chuvosos	1437	1110	1287	87
Total dos meses secos	333	247	281	15
Total do trimestre chuvoso	891	692	796	51
Total do trimestre seco	77	51	63	6
Janeiro	351	278	312	20
Fevereiro	234	173	204	15
Março	211	156	183	14
Abril	108	73	86	10
Maio	72	47	60	4
Junho	30	18	23	3
Julho	22	12	17	2
Agosto	25	19	22	1
Setembro	85	60	72	4
Outubro	150	115	133	8
Novembro	207	144	174	16
Dezembro	312	237	281	20
Legenda				
Meses chuvosos: janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro		Trimestre chuvoso: Dezembro, Janeiro e Fevereiro		
Meses secos: abril, maio, junho, julho, agosto e setembro		Trimestre seco: Junho, Julho e Agosto		

Figura 6.33 - Gráfico de altura pluviométrica total mensal média, mínima e máxima da bacia, análise do período entre 1980 e 2009.

Figura 6.34 - Mapas de altura pluviométrica total de períodos secos e chuvosos.

Figura 6.35 - Mapas de altura pluviométrica total dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril.

Figura 6.36 - Mapas de altura pluviométrica total dos meses de maio, junho, julho e agosto.

Figura 6.37 - Mapas de altura pluviométrica total dos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.

Na Figura 6.38 pode-se verificar o gráfico de altura pluviométrica total mensal, com análise em diferentes intervalos (1980 a 2009, 2000 a 2009, 1990 a 1999 e 1980 a 1989). Pela análise deste gráfico, nota-se que:

Os períodos mais chuvosos foram:

- janeiro de 2000 a 2009,
- fevereiro, março e maio de 1990 a 1999 e
- abril e junho a dezembro de 1980 a 1989.

Os períodos mais secos foram:

- janeiro a março de 1980 a 1989,
- abril a junho e agosto a outubro de 2000 a 2009 e
- julho, novembro e dezembro de 1990 a 1999

Em termos de altura pluviométrica total anual, o período mais úmido foi entre 1980 a 1989 (em média, 1649mm) e o mais seco foi entre 1990 a 1999 (em média, 1525mm).

Figura 6.38 - Gráfico de altura pluviométrica total mensal com análise em diferentes períodos.

No Apêndice E estão apresentados:

- Gráficos de séries históricas, constando índices pluviométricos totais máximos, mínimos e médios (das estações climatológicas analisadas), relativos à altura pluviométrica total: anual, de trimestres secos, de trimestres chuvosos, de meses mais secos e de meses mais chuvosos.
- Gráficos, por intervalo de análise (1980 a 1989, 1990 a 1999, 2000 a 2009), constando os valores máximos, mínimos e médios registrados em cada estação climatológica, relativos à altura pluviométrica total: anual, de trimestres secos, de trimestres chuvosos, de meses mais secos e de meses mais chuvosos.

No Apêndice F estão apresentados, para cada intervalo de análise, os mapas relativos à altura pluviométrica total: anual, de trimestres secos, de trimestres chuvosos, de meses mais secos e de meses mais chuvosos.

O gráfico da Figura 6.39 mostra os índices pluviométricos totais anuais do intervalo entre 1980 e 2009; as curvas indicam os índices médios, máximos e mínimos das estações climatológicas analisadas.

Figura 6.39 - Gráfico de altura pluviométrica total anual, média, mínima e máxima das estações climáticas analisadas do período entre 1980 e 2009.

Segundo Fich (1999), a dinâmica atmosférica apresenta diferentes comportamentos de um ano para o outro, o que resulta em índices pluviométricos interanuais significativamente diferentes. Para Silva et al. (2012), esse comportamento é explicado pela variabilidade climática natural e pelos efeitos que os sistemas meteorológicos podem ter em uma determinada região, como por exemplo os efeitos de El Niño e La Niña.

Na Figura 6.40 são apresentados gráficos que retratam a distribuição dos totais pluviométricos anuais e mensais (médios das estações climatológicas analisadas) e a contribuição em termos percentuais de cada mês para os totais pluviométricos anuais do intervalo entre 1980 e 2009.

Em todos os intervalos de análise, percebe-se uma clara sazonalidade, com alternância entre anos secos e chuvosos, que se repetem geralmente de três em três anos. As maiores anomalias relativas à amostra analisada, ocorreram nos anos de 1983 e 2001.

Os maiores índices pluviométricos totais anuais foram registrados em 1982, 1983, 1992 e 2009. Nesses anos, na média, observaram-se valores acima de 1850mm anuais. Os anos de 1984, 1990, 1999 e 2001 apresentaram os menores registros de totais pluviométricos anuais, com média entre 1375 e 1250mm.

Os trimestres chuvosos que concentraram os maiores índices pluviométricos (acima de 950mm de chuva acumulada no trimestre) foram registrados em: 1983, 1985, 2000 e 2007. Nos anos de 1980, 1983, 1986, 1989 os trimestres secos apresentaram os índices pluviométricos mais elevados, com valores acumulados no trimestre variando entre 100 e 170mm.

Em 1984, 1990, 1994, 2001 ocorreram sobre trimestres chuvosos os mais baixos índices pluviométricos; nesses anos, foram registrados valores acumulados entre 500 e 700mm (na média). Os trimestres secos, com os mais baixos índices pluviométricos, apresentaram valores acumulados médios entre 7 e 30mm, e foram registrados em: 1985, 1991, 1994, 1995, 2002 e 2003.

Figura 6.40 - Distribuição dos totais pluviométricos mensais e anuais, média das estações climatológicas analisadas) (a) e contribuição em termos percentuais de cada mês para o índice pluviométrico total anual do período entre 1980 e 2009 (b).

Nos anos de 1982, 1983 e 1991, foram registrados os maiores índices pluviométricos acumulados nos meses chuvosos do ano (acima de 1650mm). Em 1983, 1986, 2005 e 2009 incidiram os meses secos com os maiores índices pluviométricos, entre 280 e 500mm. Os meses chuvosos com os menores índices pluviométricos (entre 1000 e 1150mm) ocorreram em 1984, 1990, 1999 e 2001; já nos anos de 1981, 1985, 1991 e 2006, ocorreram os meses com os menores índices (70 e 115mm).

Dentro do intervalo de tempo estudado, o ano de 1983 exibiu índices pluviométricos extremamente elevados. Na média, os totais pluviométricos anuais, foram de 2470mm; o máximo registrado foi de 2957mm e o mínimo de 1877mm. Nesse período, os índices pluviométricos foram elevados tanto no período mais úmido quanto no período mais seco do ano. Para o referido ano, o total precipitado nos meses mais chuvosos e nos meses secos, na média, foi respectivamente de 2003mm e 467mm.

Em 2001, os índices pluviométricos totais anuais foram baixos em comparação aos outros anos, em análise. Na média, foram registrados 1269mm de pluviosidade total anual; o máximo foi de 1694mm e o mínimo de 882mm. Os meses mais secos desse ano estão dentro da média geral, já o período chuvoso é o que possui índices pluviométricos mais baixos. No trimestre chuvoso de 2001, a altura pluviométrica média das estações climáticas analisadas foi de 502mm; nos meses mais chuvosos do ano, o índice médio foi de 1073mm.

Como efeitos do El Niño na região sudeste do Brasil, o CPTEC/INPE (Centro de Previsões do Tempo e Estudos Climatológicos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (2013) cita que há um sutil aumento das temperaturas médias, mas não há um padrão característico de mudanças na distribuição da intensidade das chuvas nessa região. Na Tabela 6.7 são mostrados os períodos (no intervalo entre os anos de 1979 a 2009) de ocorrência dos eventos de El Niño e La Niña e suas respectivas intensidades.

Para verificar padrões relativos à probabilidade de ocorrência e análise de padrões relacionados à frequência de ocorrência de um determinado fenômeno, a curva de permanência consiste em um tipo de manipulação bastante utilizado. Vale destacar, contudo, que a relevância dessa análise é diretamente influenciada pelo tamanho da amostra avaliada (LANNA, 1993).

Tabela 6.7 - Períodos de ocorrência de eventos de El Niño e La Niña e suas intensidades. (Fonte: CPETC/INPE, 2013) .

EL NIÑO		LA NIÑA	
ANO	INTENSIDADE	ANO	INTENSIDADE
1979-1980	Fraca	1983-1984	Fraca
1982-1983	Forte	1984-1985	Fraca
1986-1988	Moderada	1988-1989	Forte
1990-1993	Forte	1995-1996	Fraca
1994-1995	Moderada	1998-2001	Moderada
1997-1998	Forte	2007-2008	Forte
2002-2003	Moderada		
2004-2005	Fraca		
2006-2007	Fraca		
2009-2010	Fraca		

Na Figura 6.41, pode-se notar a curva de permanência de eventos pluviométricos totais anuais da região do Médio Rio Grande. Nesse gráfico, estão apresentados valores máximos, mínimos e médios das estações climatológicas analisadas. A Figura 6.42 mostra mapas que retratam a distribuição espacial da altura pluviométrica total anual mínima com probabilidades de ocorrência de 90%, 80%, 30% e 10%.

Percebe-se que, nas extremidades das curvas, há inflexões que retratam o comportamento dos índices pluviométricos totais anuais em períodos mais úmidos (inflexão na extremidade esquerda) e em períodos mais secos (inflexão na extremidade direita). O trecho médio das curvas indica a faixa de alturas pluviométricas totais anuais dominantes.

Nas regiões com os maiores índices pluviométricos anuais, esses valores variaram entre 2930 e 1270mm de pluviosidade total anual; já nas regiões com os menores índices pluviométricos, os índices variaram entre 1870mm e o mínimo de 840mm. Na média das estações climatológicas, o máximo valor foi de 2320mm; e o mínimo, de 1080mm.

Figura 6.41 - Curva de permanência média, máxima e mínima de índices pluviométricos totais anuais. Análise do período entre 1980 e 2009.

Figura 6.42 - Mapas de altura pluviométrica total anual mínima com probabilidades de ocorrência de 90%, 80%, 30% e 10%.

Na Figura 6.43 podem-se notar os gráficos de altura pluviométrica máxima diária para períodos de retorno de 1 a 100 anos estimados a partir da distribuição de probabilidade de extremos máximos, tipo Gumbel.

As curvas da Figura 6.43(a) demonstram os valores obtidos para cada estação climática avaliada. Na Figura 6.43 (b) são apresentadas as curvas com valores máximos, mínimos e médios relativos aos resultados de altura pluviométrica máxima diária dentre todos os padrões de distribuição Gumbel das estações climáticas avaliadas.

Nota-se que o máximo valor estimado é de 196 mm em 24horas com recorrência de 100 anos, o mesmo refere-se à estimativa para a estação climatológica do município de Pedregulho, localizada na usina hidrelétrica de Luís Carlos Barreto. A média entre os valores estimados para todas as estações climatológicas é de 160 mm em 24horas com recorrência de 100 anos.

Para o período de recorrência de 50 anos, nota-se que os valores variaram entre 178 e 108mm; na média, o resultado foi de 146mm. Para os períodos de recorrência de 2, 5, 10 e 25 anos, foram estimados valores médios máximos de 24horas das estações de 78, 100, 114 e 132mm, respectivamente.

Na Figura 6.44 são mostrados os mapas de chuva intensa com duração de 24horas períodos de recorrência de 2, 10, 50 e 100 anos. A distribuição dos valores máximos de precipitação com duração de 24horas é semelhante para os diferentes períodos de recorrência.

Figura 6.43 - Gráficos de altura pluviométrica máxima de 24 horas em função de diferentes períodos de recorrência (distribuição Gumbel de probabilidades).

Figura 6.44 - Mapas de chuva intensa com período de duração de 24horas, recorrência de 2, 10, 50 e 100 anos.

Os menores valores estão localizados na porção sudeste da região do Médio Rio Grande, onde os menores valores do índice avaliado são de 71mm/dia, 99mm/dia, 110mm/dia, 118mm/dia e 126mm/dia, respectivamente, com recorrência de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Os índices pluviométricos máximos diários, relativamente mais expressivos, estão localizados na porção noroeste da área de estudo. Os máximos valores são de 92mm/dia, 130mm/dia, 151mm/dia, 166mm/dia, 181mm/dia, respectivamente, com recorrência de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Na Figura 6.45, são apresentados os gráficos de quantificação, em termos médios por município e por macrounidade ambiental, da altura pluviométrica máxima provável com período de duração de 24h e recorrência de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Considerando-se períodos de retorno de 50 e 100 anos, os maiores valores médios de chuva intensa prováveis ocorrem nos municípios de Capetinga, Ibiraci e Claraval e nas macrounidades MB_m[09](5), MB_b[19](6), MGU_b[21](4), MB_m[10](5), MB_m[17](6). Nessas áreas, os valores de chuva intensa prováveis variam entre 153 e 162mm, com recorrência de 50 anos e entre 166 e 176 considerando-se o período de retorno de 100 anos.

Os municípios de Passos, Alpinópolis e Bom Jesus da Penha e as macrounidades MB_m[14](6), MB_m[15](6) são os que apresentam os menores valores médios de chuva máxima com recorrência de 50 e 100 anos. Para o tempo de retorno de 50 anos, os valores prováveis nessas unidades territoriais variam entre 120 e 125mm. Já para 100 anos de recorrência, as magnitudes da variável em questão variam entre 166 e 176mm.

Considerando-se os períodos de retorno de 10 e 25 anos, os municípios de Bom Jesus da Penha, Alpinópolis, Nova Resende e Passos e as macrounidades MB_m[14](6), MB_m[15](6) e MB_m[16](6) são os que apresentam os menores valores prováveis de precipitação máxima diária. As referidas macrounidades e municípios apresentam valores que variam entre 100 a 102mm e 112 a 116mm, respectivamente para recorrência de 10 e 25 anos.

Ibiraci, Claraval, MB_m[10](5), MB_m[17](6) são os municípios e macrounidades que apresentam os valores mais expressivos de chuva máxima diária,

com recorrência de 10 e 25 anos. Para recorrência de 10 anos, as magnitudes pluviométricas analisadas variam entre 126 e 129mm. Já considerando-se a recorrência de 25 anos, a faixa de valores é de 145a148mm.

Em análise de resultados referentes a períodos de retorno de 2 anos, nota-se que os municípios de Nova Resende, Bom Jesus da Penha, São Pedro da União, Alpinópolis, Jacuí e as macrounidades MB_m[15](6), MB_m[16](6) apresentam os menores valores prováveis de chuva intensa (duração de 24 horas), em torno de 74mm.

As macrounidades MB_m[09](5), MB_m[10](5), MB_m[17](6) e os municípios de Claraval e Ibiraci são os que apresentam as máximas magnitudes, entre 87 e 90mm por dia de 2 em 2 anos.

Figura 6.45 - Gráficos de altura pluviométrica máxima provável com duração de 24h, com períodos de recorrência (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, média por município e por macrounidade ambiental.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

6.2.2.7.2 Temperatura

A temperatura média anual (média do período entre 2000 e 2009) varia entre 24°C e 19°C; a média é de 22°C. A Figura 6.46 apresenta o mapa que retrata a distribuição espacial da temperatura média anual na região da GD7. Nota-se que a temperatura é mais baixa na porção sul da área de estudo e aumenta gradativamente em direção à porção norte.

Podem-se notar valores máximo, médio e mínimo, de temperatura média anual no gráfico da Figura 6.47 (a). As temperaturas médias anuais mais elevadas ocorrem nas macrounidades: MB_m[07](5), MB_m[06](5), MB_m[08](5), MB_m[09](5) e MGU_m[31]; nesses compartimentos, a temperatura média é acima de 23°C.

Já as macrounidades MB_m[15](6), MB_m[13](8), MB_b[18](5) apresentam os menores índices de temperatura média anual. A maior variação entre temperaturas máximas e mínimas médias anuais ocorre nas macrounidades: MB_m[15](6), MB_m[13](8) e MB_m[16](6).

Em análise por município (Figura 6.47 (b)), nota-se que Nova Resende, Bom Jesus da Penha e São Pedro da União são os municípios que apresentam as menores temperaturas médias anuais, apresentando, respectivamente, 19,8°C; 20,3°C e 20,5°C de temperatura média anual. Ibiraci, Claraval e Sacramento apresentam as maiores temperaturas médias anuais (entre 23°C e 23,5°C). A maior variação entre temperaturas máximas e mínimas médias anuais ocorre em Alpinópolis e Passos.

Figura 6.46 - Mapa de temperatura média anual (média do período entre 2000 e 2009).

Figura 6.47 - Gráficos de temperatura média anual, máxima, média e mínima por macrounidade ambiental (a) e por município (b).

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Na Tabela 6.8, apresentam-se os resultados referentes à distribuição da temperatura média (valores máximos, mínimos e a média) na bacia, em função de diferentes períodos (mensal e anual). O gráfico que evidencia a variação mensal e anual da temperatura é apresentado na Figura 6.48. Nas Figuras 6.49, 6.50 e 6.51, podem-se notar os mapas de temperatura média mensal.

Nos meses de janeiro a março (verão), as temperaturas são as mais elevadas (média de 23,9°C). Já nos meses de junho e julho, incidem os mais baixos níveis de temperatura; na média, são 18,8°C.

Conforme se nota nos mapas que retratam a distribuição das temperaturas médias mensais, há um padrão de distribuição bem semelhante durante todo o ano, com temperaturas mais amenas no sul e mais elevadas na porção norte da área de estudo.

Na região da Serra da Canastra, área de elevadas altitudes, os níveis de temperatura apontados pelos modelos são relativamente altos. Nessa área, pode-se afirmar que há uma maior margem de erro potencial do parâmetro analisado devido à ausência de estações de monitoramento climático e à influência potencial da redução da temperatura em função da altitude.

Tabela 6.8 - Resultados de temperatura média da bacia em diferentes períodos de análise, contendo valor máximo, mínimo e médio obtido por intervalo de análise.

Temperatura	Máxima(°C)	Mínima(°C)	Média(°C)
Média anual	24,16	19,35	22,14
Janeiro	25,95	20,79	23,92
Fevereiro	26,14	21,06	23,97
Março	25,70	20,95	23,87
Abril	24,48	20,14	22,60
Mai	21,65	17,17	19,86
Junho	20,72	16,62	18,91
Julho	20,53	16,39	18,69
Agosto	22,49	18,00	20,60
Setembro	24,49	19,40	22,22
Outubro	26,06	20,72	23,70
Novembro	25,85	20,35	23,58
Dezembro	25,80	20,57	23,81

Figura 6.48 - Gráfico de temperatura média mensal e anual, com valores médio, mínimo e máximo de incidência na área de estudo.

Figura 6.49 - Mapas de temperatura média dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, média do período entre 2000 e 2009.

Figura 6.50 - Mapas de temperatura média dos meses de maio, junho, julho e agosto, média do período entre 2000 e 2009.

Figura 6.51 - Mapas de temperatura média dos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, média do período entre 2000 e 2009.

6.2.2.7.3 Radiação global e duração da radiação com base no MDEHC

Na Figura 6.52, pode-se notar o modelo anual de radiação global da região do Médio Rio Grande. Esse produto cartográfico demonstra os níveis potenciais de radiação global em função de características topográficas da área de estudo.

Nota-se que os valores potenciais de radiação global média anual variam entre 161.504 WH/m² e 71.878 WH/m². Assim, presume-se que há decréscimos de radiação, em função de sombras de relevo, que podem chegar até em torno de 55% do total.

Os valores mínimos ocorrem em encostas de declividade elevada e escarpas voltadas para o sul. Os maiores decréscimos de taxas de radiação, devido às sombras de relevo, concentram-se principalmente na região da Serra da Canastra e suas adjacências, à direita da margem do lago e nas proximidades dele, na sua porção norte, entre as hidrelétricas de Mascarenhas de Moraes e Luís Carlos Barreto.

Os valores máximos de radiação global incidem nas regiões de altitude elevada e baixa declividade e, especialmente, no extremo norte da GD7.

Nas Figuras 6.53 e 6.54, apresentam-se os modelos mensais de radiação global e os gráficos que retratam a distribuição de resultados máximos, médios e mínimos desse parâmetro e da duração da radiação (h/dia) em cada mês do ano.

A distribuição dos níveis de radiação durante o ano assemelha-se aos padrões de distribuição da temperatura atmosférica, o que já era esperado. Os meses de janeiro e dezembro são os que apresentam os valores máximos de radiação global, e o mês de junho é o que apresenta os valores mínimos.

Maio, junho e julho são os meses que têm os maiores decréscimos dos níveis de radiação devido ao sombreamento do relevo.

Na média, o tempo de duração da radiação por dia varia entre 12:24 e 7:55 horas. As durações máximas de radiação no dia variam entre 13:15 e 8:30 horas. Já as mínimas durações da radiação variam entre 7:00 e 0 horas.

Figura 6.52 - Mapa de radiação global anual da região do Médio Rio Grande.

Figura 6.53 - Modelos mensais de radiação global da região do Médio Rio Grande.

Figura 6.54 - Gráfico de radiação global mínima, máxima e média por mês da região do Médio Rio Grande.

6.2.2.7.4 Resultados obtidos a partir do balanço energético à superfície - modelo SEBAL: Albedo à superfície, Temperatura à superfície, Fluxo de calor no solo e Evapotranspiração horária

O albedo à superfície do solo controla a quantidade de energia de ondas curtas absorvidas pela superfície terrestre (LEIVA, 2007). Logo, esse parâmetro exerce controle sobre o balanço de energia à superfície. O mapa que representa a distribuição do albedo à superfície na região do Médio Rio Grande consta na Figura 6.55.

Regiões com sombreamento de relevo e espelhos d'água apresentam albedo à superfície abaixo de 10%. Áreas ocupadas por vegetação densa (matas naturais e atividades de silvicultura) e algumas por agricultura apresentaram valores de albedo variando entre 11 e 20%. Já os resultados de albedo à superfície acima de 20% ocorrem em porções do terreno ocupadas por vegetação campestre, áreas agrícolas, de pastagem, de solo exposto e afloramentos rochosos.

Os valores médios de albedo à superfície, obtidos por macrounidade e por município, podem ser verificados nos gráficos da Figura 6.56.

O nível médio de albedo à superfície, para a GD7, é de 25,8%. Nas macrounidades MB_m[14](6), MGU_m[25] e MB_m[16](6), ocorrem os maiores valores médios desse parâmetro (29 a 30%).

As macrounidades MB_m[04](6), MB_m[05](5), MB_m[06](5) apresentam os menores níveis médios de albedo; nesses compartimentos, notam-se valores entre 22 e 24%.

São José da Barra, Alpinópolis, Bom Jesus da Penha e Passos apresentam os maiores valores médios de albedo à superfície, 28%, na média. Já os menores valores médios são constatados em Sacramento, Delfinópolis, São Roque de Minas e Itamogi (23% na média).

Os reservatórios artificiais das barragens hidrelétricas de Mascarenhas de Moraes e Luís Carlos Barreto exercem significativa influência sobre os resultados de albedo à superfície. Nessas regiões, o albedo à superfície é muito baixo (abaixo de 10%); assim, compartimentos cuja área de abrangência engloba tais elementos têm uma consequente redução dos valores médios da variável em questão.

Figura 6.55 - Mapa de albedo à superfície.

Figura 6.56 – Gráficos de valores médios de albedo à superfície por macrounidade ambiental (a) e por município (b).

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Desconsiderando a região de represas, nota-se que:

- O albedo à superfície médio da região do Médio Rio Grande é de 26,5%;
- Passos é o município que apresenta o maior valor médio de albedo à superfície;
- Delfinópolis, Cássia, Sacramento e Ibiraci apresentam os menores valores médios de albedo.
- As maiores variações, na média de valores de albedo, devido a presença do lago ocorrem nas macrounidades MGU_m[23], MB_m[16](6) e nos municípios de Delfinópolis e Cássia.

Nas Figuras 6.57 e 6.58, são apresentados os mapas de temperatura à superfície e de fluxo de calor no solo da GD7. Na média, a temperatura de superfície é de 15,7°C e fluxo de calor no solo de 43,6W/m².

Predominantemente, áreas densamente vegetadas, represas e com sombreamento de relevo apresentam baixos níveis de temperatura de superfície e fluxo e calor no solo.

Já os altos níveis de ambos os parâmetros podem ser verificados principalmente em territórios cobertos por urbanização, solo exposto, afloramentos rochosos e em alguns com atividades agrícolas.

Resultados médios, de fluxo de calor no solo e temperatura de superfície, por macrounidade e município, constam na Figura 6.59.

As macrounidades MB_m[01](5), MB_m[13](8) e os municípios de Jacuí, Itaú de Minas, Nova Resende e Bom Jesus da Penha apresentaram os menores valores de temperatura à superfície. Nessas regiões os valores médios de temperatura à superfície variam entre 14,8 e 15,0°C.

Já os maiores níveis de temperatura à superfície são verificados nos municípios de Claraval e Ibiraci e nas macrounidades MB_m[09](5) e MB_m[10](5). Nessas regiões, registraram-se valores médios variando entre 17,4 e 18,1°C.

Com relação ao fluxo de calor no solo, os maiores valores médios estão entre 48,5 e 50,5 W/m² e ocorrem nas macrounidades MGU_m[31], MB_m[10](5),

MB_m[09](5) e MB_m[08](5) e nos municípios de Claraval, Ibiraci e Sacramento. As macrounidades MB_m[12](6), MB_m[11](5) e os municípios de Itaú de Minas, Jacuí e Pratápolis apresentam os menores valores médios de fluxo de calor no solo.

A distribuição e a magnitude de perdas de água da GD7, para os horários de aquisição das imagens Landsat5, podem ser verificadas na Figura 6.60. Os valores de evapotranspiração horária variaram entre 0,3 e 1,1 milímetros.

Vale destacar que o referido modelo retrata a distribuição da evapotranspiração no horário da passagem do sensor orbital sobre a área em questão (que é às 12 horas, aproximadamente). Esse é o período do dia em que as perdas de água são relativamente mais elevadas.

Este produto cartográfico é intermediário. Integrado com os modelos de evapotranspiração potencial, baseados na interpolação de dados de monitoramento climatológico, tem o potencial de definir e diferenciar regiões com maior demanda hídrica da vegetação.

Figura 6.57 - Mapa de temperatura de superfície.

Figura 6.58 - Mapa de fluxo de calor no solo.

Figura 6.59 - Gráficos de valores médios de temperatura à superfície e fluxo de calor no solo por macrounidade ambiental (a) e por município (b) desconsiderando a área do lago.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Figura 6.60 - Mapa de evapotranspiração horária.

6.2.2.7.5 Evapotranspiração potencial com base nos modelos de temperatura média mensal e anual

A Figura 6.61 apresenta o mapa de evapotranspiração potencial anual da região do Médio Rio Grande. A média para a região do Médio Rio Grande é de 1090mm/ano; os valores mínimos obtidos ocorrem na porção sul (885mm) e os máximos na porção norte (1300mm).

Os parâmetros de evapotranspiração potencial máxima, mínima e média, em diferentes períodos de análise, apresentam-se na Tabela 6.9 e no gráfico da Figura 6.62. Os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro exibem as maiores taxas de evapotranspiração potencial, apresentando taxas entre 106 e 120mm. Os demais meses apresentaram valores entre 52 e 88mm, sendo que os menores ocorrem em junho e julho, respectivamente, com perdas hídricas médias de 52 e 53mm.

Tanto por análise dos mapas das Figuras 6.60 e 6.61 quanto dos gráficos das Figuras 6.62 e 6.63, nota-se que a distribuição espaço-temporal da evapotranspiração potencial é similar à da temperatura; isso é devido a uma exercer influência direta sobre a outra.

O gráfico que retrata a distribuição das taxas máxima, mínima e média de evapotranspiração potencial, obtidas para cada macrounidade ambiental, é mostrado na Figura 6.63 (b).

As macrounidades MGU_m[31], MB_m[09](5), MB_m[08](5) e MB_m[06](5) são as que têm as maiores taxas de evapotranspiração potencial. Elas apresentam valores entre 1184 e 1150 mm/ano. As menores perdas potenciais são das macrounidades MB_b[18](5), MB_m[13](8) e MB_m[15](6), com valores médios entre 923 e 944mm/ano.

Nova Resende, Bom Jesus da Penha e São Pedro da União apresentam os menores valores de evapotranspiração potencial; apresentam taxas que variam entre 848 e 891mm/ano.

As maiores taxas potenciais de evapotranspiração podem ser observadas em Ibiraci, Claraval, Sacramento e São Roque de Minas. Nessas regiões, as taxas potenciais de evapotranspiração são entre 1168 e 1092 mm/ano.

Figura 6.61 - Mapa de evapotranspiração potencial da região do Médio Rio Grande.

Tabela 6.9 – Resultados de evapotranspiração média da bacia em diferentes períodos de análise, valores máximo, mínimo e médio obtido por intervalo de análise.

Evapotranspiração potencial	Máxima(mm)	Mínima(mm)	Média(mm)
Média anual	1303	885	1090
Janeiro	145	93	120
Fevereiro	130	84	106
Março	130	87	110
Abril	103	74	88
Maio	71	53	63
Junho	59	47	52
Julho	60	48	53
Agosto	82	60	71
Setembro	107	71	87
Outubro	139	88	111
Novembro	137	85	111
Dezembro	144	92	120

Figura 6.62 - Evapotranspiração média anual, com valores médio, mínimo e máximo de incidência na área de estudo.

Figura 6.63 - Evapotranspiração potencial média por município (a) e por macrounidade (b).

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

6.2.2.8 Análise integrada de dados climatológicos: balanço hidro-climatológico médio anual

A Figura 6.64 apresenta gráficos com a distribuição de valores de precipitação (P), de evapotranspiração potencial (ETP) e de evapotranspiração real (ETR) ao longo do ano, médios da região de estudo (a), e em pontos localizados em faixas de índices de umidade máximos (b) e mínimos (c).

A distribuição de processos de excedente, deficiência, retirada e reposição de água no solo, ao longo do ano, médios da região da GD7 (a) e em pontos localizados em faixas de índices de umidade máximos (b) e mínimos (c) estão apresentados na Figura 6.65.

De uma forma geral, ao longo do ano, as regiões com maior excedente hídrico localizam-se na porção sul da região do Médio Rio Grande e se reduzem gradativamente à medida que se caminha para a porção norte dessa área.

Nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março dominam sobre toda a bacia condições de excedente hídrico no solo. Em abril, tem início a retirada de água no solo em algumas regiões, onde há baixos níveis de precipitação e elevadas taxas de evapotranspiração. Em maio, há deficiência hídrica no solo e os processos dominantes são de retirada de água no solo; contudo, também ocorre a reposição.

Em junho, julho e agosto, há, ao longo de toda a área, processos de retirada de água no solo. Em setembro, tem início a reposição em algumas regiões do extremo sul da GD7; contudo, ainda há predominância dos processos de retirada.

Em outubro, domina a reposição de água no solo, contudo ocorrem áreas tanto com processos de excedente quanto de retirada hídrica. Em novembro, dominam os processos de excedente hídrico; contudo, ainda ocorrem regiões com processos de reposição de água no solo.

Figura 6.64 - Taxas de valores de P, ETP e ETR ao longo do ano médios da região de estudo (a) e em pontos localizados em faixas de índice de umidade máximos (b) e mínimos (c).

Figura 6.65 - Processos de retirada, reposição, excedente e deficiência hídrica no solo ao longo do ano médios da região de estudo (a) e em pontos localizados em faixas de índice de umidade máximos (b) e mínimos (c).

6.2.3 *Fluviometria*

6.2.3.1 Tratamento dos dados de monitoramento fluviométrico

Para efetuar análises dos dados fluviométricos, foi utilizado um software de regionalização e processamento de dados de vazão, o SisCAH 1.0 (Sistema Computacional para Análise Hidrológicas) desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH, 2007).

Nesse software, o banco de dados de cada estação de monitoramento fluviométrico foi importado e, a seguir, passou pelos seguintes processos de pré-processamento e processamento:

- a) Verificação da disponibilidade de dados e estacionariedade das séries
- b) Preenchimento de falhas
- c) Análise estatística das séries envolvendo:
 - Estimativas dos seguintes parâmetros:
 - i. vazão máxima com períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos;
 - ii. vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos; e
 - iii. Vazão média mensal de longa duração
 - Elaboração de gráficos de curva de permanência e hidrógrafas completas, envolvendo todo o período analisado.

6.2.3.2 Análise de dados de monitoramento fluviométrico

6.2.3.2.1 Características gerais dos postos fluviométricos e de suas bacias de contribuição

Foram analisados dados de 8 estações fluviométricas, cujas principais características podem ser verificadas nos Quadros 6.10 e 6.11; o mapa de localização das mesmas é mostrado na Figura 6.66.

O período de monitoramento analisado variou entre 1947 e 2011. A Agência Nacional de Águas (ANA) é a responsável pelos dados, o Serviço Geológico (CPRM) e Furnas Centrais Elétricas (Furnas) operam as estações fluviométricas.

Apenas dois pontos estão inseridos na região de estudo, localizados nos rios Santana e São João, as demais se encontram em áreas adjacentes. A estação fluviométrica do rio Sapucaí Paulista localiza-se a oeste da GD7; contudo, uma boa parcela da sua bacia de contribuição está inserida na região do Médio Rio Grande. Seis estações estão situadas em afluentes do rio Paraná; e duas delas, em tributários do rio São Francisco, mais especificamente, nos rios Saburá e Santo Antônio.

As principais características físicas das bacias de contribuição das estações de monitoramento fluviométrico constam no Quadro 6.10. Vale destacar que:

- As áreas de drenagem variam entre 1280 km² (rio São João) a 76km² (rio Guaxupé).
- A declividade média varia entre 10%, no rio Sapucaí Paulista e 15%, nos rios Muzambo e Santo Antônio. Já as maiores taxas de variação da declividade ocorrem nos rios Santo Antônio e Santana.
- As altitudes mínimas variam entre 706 e 832 metros, e as máximas, entre 1166 e 1400 metros. A maior amplitude altimétrica ocorre no rio Santo Antônio (209 metros); e a menor, no rio Guaxupé (72metros).

Quadro 6.10 - Características gerais das estações fluviométricas analisadas.

Código da Estação	40032000	40037000	60220000	61610000	61695000	61700000	61774000	61815000
Longitude	-46,3033	-46,2322	-47,0172	-46,3608	-46,7347	-46,8067	-47,2500	-46,7042
Latitude	-20,1508	-20,2156	-20,0139	-21,2789	-20,7389	-20,8097	-20,9833	-21,2942
Altitude (m)	734	727	960	804	710	752	722	832
Início do monitoram	1964	1964	1955	1967	1966	1947	1967	1966
Fim do monitoram	2011	2011	2006	2008	2004	2006	1983	2006
Nome	Fazenda Samburá	Fazenda da Barra	Desemboque	Juréia	Itaú de Minas	Usina Santana	Cobiça	Guaxupé
Bacia	Rio São Francisco	Rio São Francisco	Rio Paraná	Rio Paraná	Rio Paraná	Rio Paraná	Rio Paraná	Rio Paraná
Rio	Rio Samburá	Rio Santo Antônio	Rio Araguari	Rio Muzambo	Rio São João	Rio Santana	Rio Sapucaí Paulista	Rio Guaxupé
Estado	Minas Gerais	Minas Gerais	Minas Gerais	Minas Gerais	Minas Gerais	Minas Gerais	São Paulo	Minas Gerais
Município	São Roque de Minas	São Roque de Minas	Sacramento	Monte Belo	Itaú de Minas	Pratápolis	Santo Antônio da Alegria	Guaxupé
Responsável	ANA	ANA	ANA	ANA	ANA	ANA	ANA	ANA
Operadora	CPRM	CPRM	CPRM	FURNAS	desativada	CPRM	desativada	CPRM

Quadro 6.11 - Características físicas das áreas de contribuição das estações fluviométricas analisadas

Código da estação		40032000	40037000	60220000	61610000	61695000	61700000	61774000	61815000
AREA (km²)		754,15	757,52	1164,43	883,88	1280,14	472,56	825,12	75,56
Rio		Samburá	Santo Antônio	Araguari	Muzambo	São João	Santana	Sapucaí Paulista	Guaxupé
Decliv. (%)	Média	12,57	14,31	12,15	14,89	12,24	11,79	9,76	13,88
	Desvio Padrão	6,12	9,69	6,62	7,50	6,97	8,02	7,81	7,42
Alt. (m)	Mín.	755	727	964	800	710	752	706	832
	Máx.	1295	1494	1400	1241	1326	1268	1269	1166
	Desvio Padrão	84,87	209,41	87,14	98,19	87,83	91,53	105,10	72,06
Amplitude altimétrica (m)		540	767	436	441	616	516	563	334

Figura 6.66 - Mapa de localização das estações fluviométricas analisadas e suas respectivas áreas de contribuição.

6.2.3.2.2 Vazão máxima com períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Os resultados referentes às estimativas de vazão máxima a partir da distribuição de probabilidade Gumbel estão incluídos no Quadro 6.12.

Nos rios Santo Antônio e Sapucaí Paulista, notam-se as maiores taxas potenciais de excedentes hídricos superficiais; já as menores taxas foram observadas nos rios São João e Muzambo. Considerando um período de retorno de 100 anos, estimaram-se taxas de escoamento superficial de 0,178 e 0,178 m³/s.km², respectivamente nos rios São João e Muzambo. Por outro lado, para os rios Sapucaí Paulista e Santo Antônio, obtiveram-se taxas de escoamento de 0,49 e 0,74 m³/s.km², respectivamente.

As máximas magnitudes de vazões foram estimadas para os rios Santo Antônio (562m³/s) e Araguari (516m³/s); e as mínimas, para os rios Guaxupé (34m³/s) e Muzambo (166m³/s).

Quadro 6.12 - Vazão máxima em diferentes períodos de retorno, segundo distribuição de probabilidade Gumbel.

Variável estimada	Código da estação	Rio	Tempo de retorno					
			10 anos		50 anos		100 anos	
			Vazão (m ³ /s)	Rend. (m ³ /s.km ²)	Vazão (m ³ /s)	Rend. (m ³ /s.km ²)	Vazão (m ³ /s)	Rend. (m ³ /s.km ²)
Evento	40032000	Samburá	190.8	0.253	251.5	0.334	277.2	0.368
I. conf. sup. (95%)			224.2	0.297	306.5	0.406	341.4	0.453
I. conf. inf. (95%)			157.4	0.209	196.6	0.261	213.0	0.282
Evento	40037000	Santo Antônio	365.9	0.483	503.6	0.665	561.8	0.742
I. conf. sup. (95%)			437.3	0.577	620.9	0.820	698.9	0.923
I. conf. inf. (95%)			294.4	0.389	386.3	0.510	424.7	0.561
Evento	60220000	Araguari	346.8	0.298	465.9	0.400	516.3	0.443
I. conf. sup. (95%)			398.9	0.343	551.2	0.473	615.9	0.529
I. conf. inf. (95%)			294.7	0.253	380.7	0.327	416.8	0.358
Evento	61610000	Muzambo	119.8	0.136	152.1	0.172	165.8	0.188
I. conf. sup. (95%)			135.7	0.154	178.2	0.202	196.3	0.222
I. conf. inf. (95%)			103.9	0.117	126.0	0.143	135.3	0.153
Evento	61700000	São João	143.9	0.112	203.3	0.159	228.4	0.178
I. conf. sup. (95%)			169.6	0.133	245.4	0.192	277.6	0.217
I. conf. inf. (95%)			118.2	0.092	161.2	0.126	179.3	0.140
Evento	61774000	Santana	123.4	0.261	168.4	0.356	187.4	0.397
I. conf. sup. (95%)			158.2	0.335	226.3	0.479	255.2	0.540
I. conf. inf. (95%)			88.5	0.187	110.5	0.234	119.6	0.253
Evento	61695000	Sapucaí Paulista	255.2	0.309	360.3	0.437	404.7	0.490
I. conf. sup. (95%)			310.5	0.376	451.1	0.547	510.8	0.619
I. conf. inf. (95%)			199.9	0.242	269.5	0.327	298.6	0.362
Evento	61815000	Guaxupé	21.5	0.284	30.4	0.402	34.2	0.452
I. conf. sup. (95%)			25.9	0.343	37.7	0.499	42.7	0.566
I. conf. inf. (95%)			17.0	0.225	23.1	0.306	25.6	0.339

6.2.3.2.3 Vazão mínima com período de duração de 7 dias e recorrência de 10 anos.

As vazões mínimas estimadas para períodos de duração de 7 dias e recorrência de 10 anos são apresentadas no Quadro 6.13.

As maiores taxas de escoamento de base foram identificadas nos rios Saburá ($0,0081\text{m}^3/\text{s.km}^2$) e Araguari ($0,0062\text{m}^3/\text{s.km}^2$); e as menores, nos rios Guaxupé ($0,0021\text{m}^3/\text{s.km}^2$) e São João ($0,0021\text{m}^3/\text{s.km}^2$).

O bacia que apresentou o maior valor de $Q_{7,10}$ foi a do rio Araguari ($6,06\text{m}^3/\text{s}$), e a menor foi a do rio Guaxupé ($0,16\text{m}^3/\text{s}$).

Quadro 6.13 - Vazão mínima com período de duração de 7 dias e recorrência de 10 anos e seus respectivos rendimentos específicos

Estação (código)	Rio	AREA (km ²)	Interv.conf. sup. (95%)	Interv.conf. inf. (95%)	Evento (m ³ /s)	Rendimento específico (m ³ /s.km ²)
40032000	SAMBURÁ	738	6.44	5.52	5.98	0.0081
40037000	SANTO ANTÔNIO	743	4.34	3.11	3.73	0.005
60220000	ARAGUARI	1073	7.19	6.06	6.63	0.0062
61610000	MUZAMBO	882	6.33	3.94	5.13	0.0058
61695000	SAPUCAÍ PAULISTA	1283	6.51	3.33	4.92	0.0038
61700000	SÃO JOÃO	473	1.37	0.63	1	0.0021
61774000	SANTANA	814	3.74	2.09	2.91	0.0036
61815000	GUAXUPÉ	76	0.25	0.06	0.16	0.0021

6.2.3.2.4 Vazões e rendimentos específicos médios mensais (de longa duração)

No gráfico da Figura 6.67, apresentam-se os resultados de rendimentos específicos médios mensais obtidos para as áreas de contribuição de cada estação fluviométrica analisada.

O resumo dessa análise é mostrado no Quadro 6.14, que expõe os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão dos rendimentos específicos médios mensais.

Os maiores rendimentos específicos médios ocorrem nas áreas de contribuição dos rios afluentes do São Francisco; e os menores, nos rios Guaxupé e São João. As

maiores taxas de variação dos rendimentos específicos ocorreram na região do rio Santo Antônio; e as menores, nos rios Muzambo, Guaxupé e São João.

Quadro 6.14 - Rendimento específico médio mensal ($\text{m}^3/\text{s.km}^2$) em cada estação fluviométrica no período entre os anos de 1967 e 2005.

Rendimento específico médio mensal (m³/s.km²) (1967 a 2005)									
Estação (cód.)		40032000	40037000	60220000	61610000	61695000	61700000	61774000	61815000
Rio		Samburá	Santo Antônio	Araguari	Muzambo	São João	Santana	Sapucaí Paulista	Guaxupé
Rendimento	Máximo	0,0998	0,1603	0,094	0,0622	0,095	0,0963	0,0724	0,0787
	Mínimo	0,0065	0,0039	0,0054	0,0041	0,0024	0,0034	0,0024	0,0017
	Médio	0,0258	0,0293	0,0231	0,0212	0,018	0,0198	0,0186	0,0177
	Desv. Pad.	0,0143	0,0274	0,0159	0,0111	0,0117	0,0144	0,0119	0,0116

Figura 6.67 - Rendimento específico médio mensal ($\text{m}^3/\text{s.km}^2$) das áreas de contribuição das estações fluviométricas analisadas no período entre 1967 e 2005.

Os parâmetros referentes aos rendimentos específicos de longa duração, mensais e anuais, são expostos nos Quadros 6.15 e 6.16. A Figura 6.68 apresenta um gráfico que compara os rendimentos específicos médios mensais das bacias analisadas e a altura pluviométrica média mensal da região do Médio Rio Grande.

Quadro 6.15 - Rendimentos específicos médios mensais das áreas de contribuição das estações fluviométricas analisadas.

Código	40032000	40037000	60220000	61610000	61695000	61700000	61774000	61815000
Rio	Samburá	Santo Antônio	Araguari	Muzambo	São João	Santana	Sapucaí Paulista	Guaxupé
JAN	0,045	0,068	0,050	0,035	0,032	0,038	0,034	0,029
FEV	0,043	0,061	0,044	0,034	0,032	0,036	0,033	0,028
MAR	0,037	0,047	0,037	0,029	0,026	0,029	0,028	0,024
ABR	0,030	0,030	0,027	0,022	0,020	0,021	0,021	0,018
MAI	0,022	0,018	0,019	0,019	0,015	0,016	0,016	0,016
JUN	0,018	0,014	0,015	0,016	0,013	0,013	0,013	0,014
JUL	0,016	0,011	0,013	0,014	0,011	0,011	0,011	0,012
AGO	0,014	0,010	0,011	0,013	0,010	0,009	0,009	0,010
SET	0,014	0,010	0,011	0,014	0,010	0,010	0,010	0,010
OUT	0,018	0,014	0,015	0,015	0,011	0,012	0,011	0,012
NOV	0,023	0,026	0,022	0,018	0,014	0,015	0,015	0,015
DEZ	0,035	0,049	0,035	0,027	0,023	0,026	0,024	0,023

Quadro 6.16 - Vazão média anual de longa duração e seus respectivos rendimentos específicos das estações fluviométricas analisadas.

Estação (código)	Rio	Área (km ²)	Vazão Média de Longa Duração (m ³ /s)	Rendimento específico (m ³ /s.km ²)
40032000	Samburá	738	19,23	0,0261
40037000	Santo Antônio	743	21,17	0,0285
60220000	Araguari	1073	27,99	0,0261
61610000	Muzambo	882	18,47	0,0209
61695000	Sapucaí Paulista	1283	23,17	0,0181
61700000	São João	473	7,68	0,0162
61774000	Santana	814	15,18	0,0186
61815000	Guaxupé	76	1,33	0,0176

Nos meses de janeiro e fevereiro, os rendimentos específicos médios variam entre 0,068 m³/s.km² (rio Santo Antônio) e 0,028m³/s.km² (rio Guaxupé); já em de agosto e setembro, os valores estão entre 0,009 m³/s.km² (rios Santana e Sapucaí Paulista) e 0,014 m³/s.km² (Samburá e Muzambo).

Em termos médios anuais, os maiores rendimentos específicos foram observados nos rios Samburá (0,0285 m³/s.km²), Araguari e Santo Antônio; e os menores, nos rios São João (0,0162 m³/s.km²) e Guaxupé.

Figura 6.68 - Gráficos comparativos entre rendimentos específicos médios mensais das estações fluviométricas e altura pluviométrica total mensal média da região do Médio Rio Grande.

As séries históricas de todos os pontos de monitoramento mostram que os maiores rendimentos específicos médios mensais ocorrem em janeiro e fevereiro; e os menores, em agosto e setembro.

Os rios Saburá e Muzambo apresentam os maiores rendimentos específicos no período seco; já no período úmido, seus rendimentos estão contidos na faixa de valores medianos.

Comparando os rios Santana, Sapucaí Paulista e São João, as maiores taxas médias de escoamento do período úmido ocorrem no Santana; e os menores, no São João; já no período seco, a situação se inverte.

As maiores vazões médias mensais do período úmido foram registradas nos rios Araguari, Santo Antônio. Já no período seco, as maiores magnitudes de vazão incidem nos rios São João e Araguari.

Pode-se subdividir o ano em três períodos com processos predominantes de escoamento:

- Úmido – Período de excedentes hídricos, ocorre predominantemente entre dezembro e março. As taxas médias de escoamento são elevadas e variam entre 0,68 e 0,23 m³/s.km². A altura pluviométrica média mensal varia entre 204 e 300mm. Nesse período, a vazão dos rios é mantida predominantemente pelo escoamento superficial direto.
- Seco – Temporada de deficiências hídricas, ocorre predominantemente entre julho e setembro. As taxas médias de escoamento são baixas e variam entre 0,009 e 0,016 m³/s.km². A altura pluviométrica média mensal varia entre 17 e 70mm. Nesse período a vazão dos rios é mantida predominantemente pelo escoamento de base.
- Transição:
 - Úmido-Seco – ocorre predominantemente entre abril e junho. A altura pluviométrica média mensal varia entre 86 e 60mm. As taxas de escoamento são médias e variam entre 0,030 m³/s.km² em abril e 0,013 m³/s.km² em junho.
 - Seco-Úmido – ocorre predominantemente entre outubro e novembro. Período de reposição de água no solo. A altura pluviométrica média mensal varia entre 133 e 174mm. As taxas de

escoamento variam entre $0,011 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$ em outubro e $0,026 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$ em novembro.

6.2.4 Avaliação Geomorfométrica

Os principais processos metodológicos adotados para a caracterização geomorfométrica são esboçados no fluxograma da Figura 6.69.

Figura 6.69 - Fluxograma de aspectos metodológicos adotados para a caracterização geomorfológica da área

O método empregado envolveu estruturação da base topográfica, a preparação do modelo digital do terreno, a elaboração de modelos derivados da base topográfica e/ou do modelo digital de elevação e o levantamento de variáveis morfométricas de bacias hidrográficas. Tais procedimentos estão descritos com maior detalhamento nos itens a seguir.

Vale ressaltar que os softwares de geoprocessamento e sensoriamento remoto utilizados nesta etapa do trabalho foram os seguintes: *AutoCadMap2012*®, *ArcGis10*®, *ENVI4.8*® e *TerraView4.2.2*.

6.2.4.1 Estruturação da base topográfica e preparação do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC)

Para a caracterização geomorfológica da região do Médio Rio Grande, fez-se necessário o uso de ferramentas de cálculo de densidade de eventos. Para executar tais cálculos, empregaram-se testes de raios de pesquisa, que variaram entre 500 e 1500 metros. Os raios de pesquisa testados foram baseados em recomendações de Sampaio (2009), Volkmer et. al. (2010) e Magri e Collares (2011).

Com o objetivo de garantir a qualidade da informação nas bordas da área de estudo, foi necessário efetuar um “buffer” de 1500 metros na base topográfica. Esse procedimento deu-se pela digitalização, a partir de cartas topográficas do IBGE, de curvas de nível, da rede de drenagem e de pontos cotados, além da base já existente.

A sequência metodológica para preparação do MDEHC lançou mão de ferramentas e procedimentos preconizados por ESRI (2013). A elaboração do MDEHC valeu-se de procedimentos de correção na base topográfica (curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem), interpolação das informações da base, correção de erros na base, identificação e preenchimento de depressões no modelo.

O modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) foi gerado, utilizando-se o interpolador “*Topo to Raster*”, presente na extensão “*3D Analyst*” do software *ArcGis10*®; o tamanho do pixel de saída programado foi de 10 metros.

A ferramenta de interpolação supracitada consiste em um método de interpolação específico para a elaboração de modelos de terreno hidrologicamente consistentes, construída a partir de rotinas desenvolvidas por Hutchinson (1988 e 1989). A aplicação dessa ferramenta permitiu a obtenção de modelos de superfície que possuem uma rede de drenagem estruturada e conectada, e uma correta representação de vertentes e canais.

Os arquivos de entrada, no formato "*shape*", utilizados pela ferramenta de interpolação supracitada foram:

- rede de drenagem, considerando-se a direção do fluxo dos canais de drenagem (comando – "*stream*"),
- as curvas de nível, considerando-se as cotas dessas isolinhas de altitude (comando – "*contour*"),
- os pontos cotados, considerando-se as cotas de cada ponto (comando – "*point elevation*"),
- os barramentos e lagos, que são áreas que retêm o escoamento (comando – "*lake*"), e
- o limite da área de estudo, que consiste no limite da área de interpolação (comando – "*boundary*").

Para a validação do MDEHC, foram produzidas curvas de nível, a partir de uma primeira interpolação e, posteriormente, essas curvas foram comparadas visualmente com as curvas de nível originais vetorizadas das cartas topográficas, conforme recomendado pelo manual do ArcGIS (ESRI, 2013). Para elaborar as curvas de nível a partir do MDE, utilizou-se o comando "*Countour*", da extensão "*3D Analyst*", adotando-se a metade do intervalo original das curvas de nível, 10 metros.

No processo de validação, encontraram-se erros nos arquivos no formato "*shapefile*" da rede de drenagem, das curvas de nível e de pontos cotados. Dessa forma, foi necessária uma verificação acurada, na base topográfica. Para tanto, elaborou-se uma grade regular de 6000 x 6000 metros e sobre cada célula foi verificada a consistência hidrológica entre a base topográfica e o modelo digital do terreno.

Além disso, dos erros supracitados, avaliaram-se divergências entre o modelo digital de elevação obtido pela interpolação da base topográfica e do modelo SRTM.

Nos casos em que foram constatadas inconsistências, os arquivos no formato "*shapefile*" de rede de drenagem, pontos cotados e curvas de nível foram corrigidos, quanto à direção do fluxo da rede de drenagem e quanto às cotas dos pontos e das curvas de nível.

Assim, a partir da base topográfica, corrigida, foi novamente efetuado o procedimento de interpolação de dados e consistência hidrológica do modelo digital de elevação a partir das ferramentas hidrológicas do software *ArcGIS10*®.

Além das correções supracitadas, utilizaram-se ferramentas de correção do modelo digital de elevação presentes no pacote de ferramentas hidrológicas do software *TerraView 4.2.2*.

6.2.4.1.1 Elaboração de modelos geomorfométricos derivados da base topográfica e/ou do MDEHC

Os modelos geomorfométricos derivados da base topográfica e/ou MDEHC foram os seguintes:

- Carta de declividade
- Modelo de direção do fluxo hidrológico
- Modelo de área de fluxo acumulado
- Carta de distância vertical da drenagem mais próxima (HAND)
- Carta de índice de concentração de canais de drenagem (ICCD)
- Carta de índice de concentração de rugosidade (ICR)
- Carta de índice de concentração de gradientes de canais (ICGC)

Os modelos de declividade, de direção de fluxo hidrológico, de fluxo acumulado e de distância vertical da drenagem mais próxima foram elaborados a partir das ferramentas presentes no módulo de ferramentas hidrológicas do software *TerraView 4.2.2*. As ferramentas e os dados de entrada, utilizados para tais modelos, são mostrados no Quadro 6.17.

Quadro 6.17 - Ferramentas e dados de entrada para elaboração dos modelos de fluxo acumulado, declividade e direção do fluxo.

Modelo	Ferramenta	Dados de entrada
Fluxo acumulado	"Contributing área"	MDEHC
Declividade	"Slope"	MDEHC
Direção de fluxo	"Flow Extraction"	Fluxo acumulado
HAND	"HAND"	Canais de drenagem com fluxo acumulado maior que 121500 pixels ou 12,15km ²
		Direção de fluxo
		MDEHC

A Figura 6.70 esquematiza o procedimento utilizado pelo algoritmo desenvolvido por Rennó (2008) para a obtenção do modelo de distância vertical da drenagem mais próxima (HAND). Vale lembrar que, no caso da elaboração do modelo HAND, foram consideradas apenas as drenagens que apresentaram área de fluxo

acumulado igual ou superior a 12,15km² e que correspondem, na maior parte dos casos, aos canais de ordem igual ou superior a 4^a.

Figura 6.70 - Procedimento para calculo da matriz HAND (adaptado de Rennó, 2008).

A elaboração das matrizes que representam distintos níveis de concentração de rugosidade, de gradientes de canais e de canais de drenagem, foi efetuada com auxílio da ferramenta "Kernel density".

Os arquivos de entrada selecionados para a preparação das referidas matrizes e o campo população programado são descritos no Quadro 6.18.

Quadro 6.18 - Arquivos de entrada e campo população programados para geração das matrizes com os diferentes índices geomorfométricos.

Índice	Arquivo de entrada (formato vetorial shapefile)	Campo população
ICR	pontos com informações de declividade	declividade
ICGC	linhas que representam a rede de drenagem com informações referentes ao gradiente de cada canal de drenagem	gradiente de canais de drenagem
ICCD	linhas que representam a rede de drenagem	nenhum

A ferramenta "Kernel Density" calcula a magnitude por unidade de área de polilinha usando uma função kernel para se ajustar a uma superfície suavemente cônica

para cada polilinha (ESRI, 2013). A função kernel é adaptada a partir da função quadrática para densidades, descrita por Silverman (1986).

Segundo ESRI (2013), por meio dessa ferramenta, uma superfície suavemente curva é colocada sobre cada linha; seu valor maior é na linha e diminui à medida que se afasta de cada linha (Figura 6.71 (a)). A superfície é definida de modo que o volume sob a superfície seja igual ao produto de comprimento de linha e o valor do campo população. A densidade de cada célula de varredura de saída é calculada pela soma de valores de todas as superfícies de "Kernel" (Figura 6.71 (b)).

Figura 6.71 - Forma de cálculo de densidade por meio da ferramenta "Kernel Density", (a) Superfície suavemente curva colocada sobre cada linha; (b) Soma dos valores de todas as superfícies de kernel.

O uso da ferramenta "Kernel density" para elaborar as cartas geomorfológicas, com índices de concentração, buscou seguir sugestões, relacionadas ao raio de pesquisa, de Sampaio (2009), Magri e Collares (2011) e Volkmer et al. (2010).

Após vários testes, optou-se por utilizar um raio de pesquisa de 1128 metros, que corresponde a uma área de abrangência de 4 quilômetros quadrados. O tamanho de pixel de saída programado foi de 10 metros.

6.2.4.2 Levantamento morfométrico

O levantamento de variáveis morfométricas demandou a preparação da base de dados, com relação a arquivos no formato vetorial referentes à rede de drenagem e à delimitação de bacias de drenagem.

Esta etapa envolveu mensurações lineares, areais e hipsométricas, através do software e *ArcGis10*®.

No Quadro 6.19 são apresentadas as mensurações básicas realizadas e a forma de medição de cada parâmetro. No Quadro 6.20, apresentam-se as variáveis morfométricas derivadas das mensurações básicas e suas respectivas equações.

Quadro 6.19 - Procedimentos utilizados para as mensurações dos parâmetros morfométricos básicos.

Variável	Definição básica	Ferramenta/Comando	Unidade de medida
C	Comprimento da bacia - Maior distância medida, em linha reta, entre a foz e o ponto mais distante ao longo do perímetro	Medição direta, pela ferramenta " <i>measure</i> " conforme critérios estabelecidos pela definição básica	m ou km
C_p	Comprimento da bacia - Maior comprimento da bacia, medido paralelamente a linha principal de drenagem		km
Talvegue	Linha principal de drenagem	Definição do talvegue por uma série de comparações de comprimentos e definição da linha de drenagem com maior comprimento	m ou km
L_{talvg}	Comprimento total do rio principal	Comando " <i>length</i> ", da calculadora geométrica	m ou km
N	Número total de canais e número de canais por ordem de ramificação, No sistema de hierarquização fluvias de Strahler, o número total de canais corresponde ao número de canais de ordem 1	Pelo comando " <i>length</i> ", da calculadora geométrica, é calculado o comprimento de cada canal de drenagem. A seguir, é efetuada a somatória do comprimento dos canais através da ferramenta " <i>Sumarize</i> ", a qual cria uma tabela resumo com contagem de seguimentos de drenagem (L) para cada compartimento analisado e soma dos comprimentos dos canais de drenagem por ordem de ramificação e por compartimento (Li)	canais
Li	Comprimento total de canais por ordem de ramificação		m ou km
A	Área da bacia	Comando " <i>area</i> ", da calculadora geométrica,	m ² ou km ²
P	Perímetro da bacia	Comando " <i>perimeter</i> ", da calculadora geométrica	m ou km
X_n, Y_n	Coordenadas X e Y da nascente do canal avaliado	Comando " <i>X ou Y Coordinate of Line Start</i> ", da calculadora geométrica	m
X_f, Y_f	Coordenadas X e Y da foz do canal avaliado	Comando " <i>X ou Y Coordinate of Line End</i> ", da calculadora geométrica	m
H_{max}	Altitude máxima da bacia	Ferramenta " <i>Zonal Statistics as Table</i> " da extensão " <i>Spatial Analyst Tools</i> " que permite, por meio de um único procedimento, efetuar a mensuração das variáveis em questão, para todos os compartimentos analisados	m
H_{máx_i}	Altitude máxima do canal		
H_{mín}	Altitude mínima da bacia		
H_{mín_i}	Altitude mínima do canal		
Curva hipsométrica da bacia	Gráfico altitude x % de área pelo intervalo de classe hipsométrica		

Quadro 6.20 - Procedimentos adotados na estimativa de parâmetros morfométricos derivados dos parâmetros básicos.

Variável Derivada	Definição básica	Equação	UNIDADES DE MEDIDA
Ft	Fator topográfico	$Ft = Dh.lc.Rr$	$\frac{Dh}{(canais/km^2).lc(km^2/km^2).Rr(m/m)}$
L_{vet}	Comprimento vetorial do rio principal	$L_{vet} = (((Xn-Xf)^2) + (Yn-Yf)^2)^{0.5}$	m ou km
Fr_1	Frequência de canais de primeira ordem	$Fr_1 = (N1/Nb).100$	%
Rb	Relação de bifurcação	$Rb = Ni/Ni+1$	-
Lt	Comprimento total da rede de drenagem	$\sum Li + \sum Li+1 \dots$	m ou km
Lmi	Comprimento médio de canais por ordem de ramificação	$Lmi = Li/Ni$	m ou km
$RLmi$	Relação entre o comprimento médio dos canais	$RLmi = Lmi/Lmi-1$	-
$\bar{L}$	Largura média da bacia	$\bar{L} = A/C$	$A (km^2); C (km); \bar{L} (km)$
Eps	Extensão do percurso superficial	$Eps = (1/2Dd)*1000$	$Dd (km/km^2); Eps (m)$
Si	Índice de sinuosidade	$Si = Lt_{avg}/L_{vet}$	-
Gi	Gradiente de canais	$Gi = Hm_i/L_{vet} i$	-
Hm	Amplitude altimétrica máxima da bacia	$Hm = Hm_{\max} - Hm_{\min}$	m
Hm_i	Amplitude altimétrica do canal	$Hm = Hm_{\max i} - Hm_{\min i}$	m
kf	Fator forma	$kf = A/L_{ta}^2$	-
kc	Coeficiente de compacidade ou índice de forma	$kc = P(1/2\sqrt{\pi A})$ $kc = P(1/2\sqrt{\pi A})$	-
lc	Índice de circularidade	$lc = A/Ac$	-
Dh	Densidade hidrográfica	$Dh = N1/A$	$canais/km^2$ ou $canais/m^2$
Dc	Densidade de confluências	$Dc = Nc/A$	$confluências/km^2$
Dd	Densidade de drenagem	$Dd = Lt/A$	km/km^2
Cm	Coeficiente de manutenção	$Cm = (1/Dd).1000$	$Dd (km/km^2); Cm (m/m^2)$
Tt	Textura topográfica	$Tt = 10^{0,219649+1,115\log Dd}$	(km/km^2)
Rr	Relação de relevo	$Rr = Hm/Cp$	$Hm (m); Cp (km)$
Tr	Taxa de relevo	$Tr = Hm/C$	-
$n^{\circ}r$	Número de rugosidade	$n^{\circ}r = Tr.Dd$	km/km^2

6.2.4.3 Avaliação dos resultados geomorfométricos da região do Médio Rio Grande

6.2.4.3.1 Hipsometria

O modelo digital de elevação hidrologicamente consistente é mostrado na Figura 6.72. A amplitude altimétrica da GD7 é de 919 metros; ela varia entre 572 metros na porção noroeste do lago e 1496 metros na região da Serra da Canastra. Apresenta uma altitude média de 922 metros. O desvio padrão da altitude é de 175 metros.

Os padrões de variação da altimétrica das macrounidades ambientais constam no Quadro 6.21. Os maiores níveis de amplitudes altimetrias ocorrem nas macrounidades MB_m[04](6), MB_m[01](5) e MB_m[03](6) (entre 816 e 762m), já os menores ocorrem nas macrounidades MB_b[19](6) (423m) e MGU_m[25] (301m).

As macrounidades MB_m[01](5) e MGU_m[31] apresentam os maiores níveis de variação altimétrica e apresentam, respectivamente, um desvio padrão de 215 e 206 metros. As menores taxas de variação são de 53 e 81 metros, nas macrounidades MGU_m[25], MB_b[19](6) e MB_b[18](5).

As unidades ambientais U[26]4(03), U[28]8(04) apresentam as maiores taxas de variação altimétrica, com desvio padrão de 250 e 231 metros, respectivamente. Já as maiores amplitudes altimétricas ocorrem nas unidades ambientais U[31]8(09) (820m) e U[28]8(04) (818m).

Quadro 6.21 - Altimetria das macrounidades ambientais que compõem a área de estudo.

Código	Macrounidade	Altitude (m)				Amplitude altimétrica (m)
		Minima	Máxima	Média	Desvio Padrão	
1	MB_m[01](5)	679,96	1449,53	989,74	215,39	769,57
2	MB_m[02](5)	679,96	1353,29	795,00	154,73	673,32
3	MB_m[03](6)	679,96	1442,49	1124,80	193,85	762,52
4	MB_m[04](6)	679,49	1495,76	1111,69	177,30	816,27
5	MB_m[05](5)	677,79	1290,60	884,82	163,26	612,82
6	MB_m[06](5)	673,95	1305,88	1116,07	165,63	631,93
7	MB_m[07](5)	666,19	1242,55	838,69	100,89	576,36
8	MB_m[08](5)	631,56	1272,82	1064,47	144,09	641,26
9	MB_m[09](5)	635,58	1164,30	914,12	95,48	528,73
10	MB_m[10](5)	636,27	1278,05	1002,93	115,08	641,78
11	MB_m[11](5)	679,96	1248,45	835,07	108,38	568,49
12	MB_m[12](6)	679,96	1289,51	856,50	131,74	609,54
13	MB_m[13](8)	679,96	1343,43	950,13	124,54	663,46
14	MB_m[14](6)	679,96	1210,68	818,52	88,85	530,72
15	MB_m[15](6)	679,96	1348,47	899,91	130,20	668,50
16	MB_m[16](6)	679,96	1250,08	816,19	107,24	570,12
17	MB_m[17](6)	632,59	1221,87	877,37	125,86	589,28
18	MB_b[18](5)	801,98	1255,23	984,58	80,60	453,26
19	MB_b[19](6)	763,30	1186,99	911,09	82,49	423,69
20	MGU_b[20](4)	776,61	1212,33	990,97	94,57	435,71
21	MGU_b[21](4)	788,16	1285,44	1021,42	92,68	497,29
23	MGU_m[23]	679,96	1386,98	817,56	163,85	707,01
24	MGU_m[24]	679,96	1349,45	756,69	92,99	669,49
25	MGU_m[25]	679,96	981,09	751,85	53,12	301,13
26	MGU_m[26]	679,96	1392,14	840,79	181,33	712,17
27	MGU_m[27]	679,96	1324,83	768,38	125,81	644,87
28	MGU_m[28]	678,18	1289,61	838,21	180,04	611,42
29	MGU_m[29]	639,74	1180,21	773,19	131,41	540,47
30	MGU_m[30]	628,40	1126,07	851,39	107,68	497,68
31	MGU_m[31]	627,09	1269,13	946,44	206,05	642,04

Figura 6.72 - Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente da região do Médio Rio Grande.

6.2.4.3.2 Declividade

A carta de declividades da região do Médio Rio Grande é apresentada na Figura 6.73, os valores médios e o desvio padrão da declividade por macrounidade ambiental são mostrados no Quadro 6.22.

A declividade da GD7 apresentou valores variando entre 0 e 161%. A média foi de 13%; e o desvio padrão, de 12%. As regiões com os maiores níveis inclinométricos estão localizados na Serra da Canastra, região à direita do lago.

As macrounidades MGU_m[30], MB_m[07](5), MB_m[04](6), MB_m[05](5), MB_m[03](6) e MB_m[01](5) apresentam os maiores valores médios de declividade (entre 21 e 24%). Nesses compartimentos, notam-se, também, altos níveis de variação desse parâmetro, com um desvio padrão entre 14 e 20%.

As menores declividades ocorrem na macrounidade MGU_b[20](4) (9,8%). Os menores níveis de taxas de variação da declividade são notados nos grupo de macrounidades afluentes da porção baixa do rio Grande (porção oeste da área de estudo) e na macrounidade MGU_m[25], região de transição entre as bacias do rio São João, do Córrego da Onça e do Ribeirão São Pedro e a região do lago.

Quadro 6.22 - Média e desvio padrão da declividade por macrounidade ambiental.

Código	Macrounidade	Declividade (%)		Código	Macrounidade	Declividade (%)	
		Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão
1	MB_m[01](5)	21.9	16.1	16	MB_m[16](6)	11.5	9.5
2	MB_m[02](5)	12.6	11.8	17	MB_m[17](6)	14.7	13.1
3	MB_m[03](6)	22.1	16.6	18	MB_b[18](5)	11.4	9.4
4	MB_m[04](6)	22.7	17.6	19	MB_b[19](6)	11.3	8.6
5	MB_m[05](5)	22.3	18.2	20	MGU_b[20](4)	9.8	7.1
6	MB_m[06](5)	15.9	15.3	21	MGU_b[21](4)	10.4	6.9
7	MB_m[07](5)	23.6	15.0	23	MGU_m[23]	12.2	12.2
8	MB_m[08](5)	12.7	11.2	24	MGU_m[24]	11.3	11.3
9	MB_m[09](5)	14.2	11.7	25	MGU_m[25]	11.2	8.4
10	MB_m[10](5)	11.1	9.7	26	MGU_m[26]	13.1	12.6
11	MB_m[11](5)	13.2	11.6	27	MGU_m[27]	10.4	10.5
12	MB_m[12](6)	12.9	9.9	28	MGU_m[28]	12.1	11.5
13	MB_m[13](8)	14.5	10.4	29	MGU_m[29]	13.8	14.2
14	MB_m[14](6)	12.1	9.8	30	MGU_m[30]	24.0	20.7
15	MB_m[15](6)	15.4	11.3	31	MGU_m[31]	15.3	14.0

Figura 6.73 - Carta de declividades da região do Médio Rio Grande.

6.2.4.3.3 Índice de concentração de rugosidade

Patton e Baker (1976) mostraram que áreas potencialmente assoladas por cheias relâmpago são previstas como possuidoras de índices elevados de rugosidade, incorporando fina textura de drenagem, com comprimento mínimo do escoamento superficial em vertentes íngremes e altos valores de gradientes dos canais.

Sampaio (2009) propõe o uso do estimador kernel para a análise de dispersão ou concentração espacial de fenômenos pontuais. O objetivo dessa proposta é eliminar a classificação pontual do relevo apoiada em valores similares ao proposto por Hobson (1972).

A Figura 6.74 ilustra as principais etapas da elaboração da carta de índice de concentração de rugosidade. Essa imagem mostra, inicialmente, os modelos de declividade (que contém valores pontuais desse parâmetro) e o resultado da aplicação do estimador kernel (que relaciona uma superfície plana à superfície do terreno em um raio de pesquisa), o modelo de índice de concentração de rugosidade.

Figura 6.74 - Procedimentos metodológicos e resultados obtidos para elaboração da carta de ICR.

Para Sampaio (2009), o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) pode ser utilizado para fins de identificação prévia de unidades morfológicas/morfométricas, como um modelo quantitativo de comparação entre diferentes ambientes morfológicos, ou ainda, como uma ferramenta complementar aos atuais índices de dissecação e de rugosidade.

A Figura 6.75 apresenta o modelo de concentração de rugosidade da região do Médio Rio Grande. Esse produto cartográfico evidencia unidades regionais com padrões de rugosidade altos, médios e baixos.

Por análise da carta de ICR da GD7, constata-se que:

- planícies, vales, platôs, colinas e morros suaves apresentam níveis de rugosidades superficial predominantemente baixos;
- regiões de serras e escarpas apresentam altos níveis de rugosidade;
- os morros têm, geralmente, níveis de rugosidade variando entre médios e altos; e
- os morrotes ocorrem sob níveis médios de rugosidade.

As unidades territoriais sob rochas quartzíticas apresentam níveis médios a muito altos de rugosidade do relevo (mais que 50% da sua área de abrangência) e podem ser definidas como regiões serranas e escarpadas, com predominância de neossolos litólicos. Nessas regiões, o controle sobre os processos de escoamento superficial e infiltração de água é exercido predominantemente pelo relevo, muito rugoso, e pela litologia.

Por outro lado, nas regiões com níveis de rugosidade médio a baixo, o controle sobre as potencialidades de escoamento superficial é exercido por materiais terrestres (solos e rochas) e pelo uso e ocupação do solo.

Figura 6.75 - Carta de Índice de concentração de rugosidade (ICR) da região do Médio Rio Grande.

6.2.4.3.4 Índice de concentração de canais de drenagem

Uma variável considerada de suma importância sobre o potencial de escoamento superficial é a densidade de canais de drenagem (Dh). Ela é diretamente proporcional à velocidade com que a água precipitada, responsável pelo escoamento superficial, chegará ao exutório da bacia.

A densidade hidrográfica retrata o grau de dissecação topográfica e a quantidade de canais disponíveis para o escoamento superficial. Consequentemente, esse parâmetro representa o controle sobre a capacidade de infiltração de água no terreno exercido por diferentes tipos de litologia, uso e ocupação, clima e solos (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A carta de ICCD (índice de concentração de canais de drenagem) da GD7 é apresentada na Figura 6.76.

Os resultados demonstram que os valores de Dh variam entre 0 e 8,4 canais/km². Os máximos ocorrem na macrounidade MGU_m[31].

A faixa mediana de densidade hidrográfica pode ser verificada nas macrounidades MB_m[01](5), MB_m[13](8), MB_m[05](5), MB_m[03](6), MB_m[09](5) e MB_m[04](6). Nesses compartimentos, presume-se que os materiais terrestres tenham baixas taxas de infiltração de água.

As maiores taxas de variação (desvio padrão) são notadas nas macrounidades MB_m[08](5), MGU_m[31] e MB_m[06](5) no extremo norte da GD7.

Os resultados, referentes à média e desvio padrão, de densidade hidrográfica, por unidade geológica, constam na Figura 6.77.

As regiões com rochas calcissilicáticas, basaltos e diabásios da formação Serra Geral, coberturas quaternárias e arenitos não silicificados apresentaram os menores níveis de densidade hidrográfica. As áreas com rochas ultramáficas, milonitos e xistos apresentaram os maiores níveis médios de densidade hidrográfica.

Figura 6.76 - Carta de Índice de concentração de canais de drenagem (ICCD) da região do Médio Rio Grande.

Figura 6.77 - Gráfico de quantificação da densidade hidrográfica média e suas taxas de variação por unidade geológica.

6.2.4.3.5 Índice de concentração de gradientes de canais

A relação entre a amplitude altimétrica e o comprimento de um segmento fluvial é denominada por Horton (1945), Straler (1952) e Christofolletti (1970) de gradiente do canal. Esse parâmetro é indicativo da velocidade de escoamento no canal de drenagem.

Quanto maior for o gradiente do canal, menor será o seu tempo de concentração de águas e volume de fluxo à superfície. Assim, o gradiente do canal é inversamente proporcional ao tempo de pico de inundações/enchentes.

Canais com altos gradientes são menores, têm maior energia hidráulica (maior capacidade de erosão e transporte) e carregam menos água (menor descarga). Já aqueles com baixos gradientes são mais longos, profundos e possuem maior estoque de água (maior descarga) e menor energia.

A mensuração do gradiente dos rios é essencial na demarcação de regiões com diferentes tipos de processo fluvial, na formação do escoamento superficial, que pode levar a inundações/enchentes e aos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

A carta de índice de concentração de gradientes de canais consta na Figura 6.78. As regiões, à direita da margem do lago e no extremo norte da GD7, detêm os maiores índices de concentração de canais de drenagem com elevados gradientes.

Nesse produto cartográfico, considera-se que as classes de ICGC (índice de concentração de gradientes de canais) média a muito alta são porções do terreno com significativa potencialidade à ocorrência de cheias relâmpago (flash flood) e com baixa potencialidade, do terreno, de regularização do fluxo de água superficial.

Identificaram-se os maiores níveis de concentração de canais com alta energia hidráulica nas macrounidades: MB_m[09](5), MGU_m[31], MB_m[04](6), MB_m[03](6), MB_m[05](5) e MB_m[01](5).

Os maiores níveis de regularização do fluxo superficial e descarga (baixos níveis de ICGC) são notados nas macrounidades: MGU_b[20](4), MGU_b[21](4), MGU_m[27], MGU_m[28] e MGU_m[25].

Figura 6.78 - Carta de Índice de concentração de gradientes de canais da região do Médio Rio Grande.

6.2.4.3.6 Distância vertical da drenagem mais próxima

A elaboração desse modelo de distância vertical da drenagem mais próxima objetivou relacionar aspectos hidrológicos aos geomorfológicos a partir de um processo de normalização de dados topográficos.

Para a preparação do documento cartográfico em questão, lançou-se mão do algoritmo HAND, desenvolvido por Rennó et al. (2008). Nele os valores são obtidos a partir da estimativa da diferença relativa entre cada pixel da matriz e o ponto do curso d'água mais próximo.

Os valores apresentados nessa carta são em relação aos canais de drenagem considerados mais próximos. Nesse caso, são aqueles de ordem de ramificação igual ou superior a 4ª.

Segundo Rodrigues et al. (2011), a normalização executada pelo modelo leva a grandes implicações, permite a comparação de terrenos separados topograficamente e a predição de água contida no solo.

As mensurações realizadas pelo algoritmo permitiram o agrupamento de pixels em zonas com padrões geomorfológicos e hidrológicos similares, com forte significado ecológico e geomorfológico.

Na Figura 6.79, consta a carta de distância vertical da drenagem mais próxima. Esse documento cartográfico está reclassificado nas seguintes zonas:

- baixios topográficos (planícies de inundação) com distância vertical da drenagem igual ou inferior a 5 metros;
- áreas de transição entre baixios topográficos e encostas com distância vertical da drenagem entre 5 e 15 metros;
- encostas e topos de colinas com distância vertical da drenagem entre 15 e 50 metros;
- encostas e topos de colinas e morrotes com distância vertical da drenagem entre 50 e 100 metros;
- encostas e topos de morro com distância vertical da drenagem entre 100 e 200 metros e
- regiões de topos de morro e serras com distância vertical da drenagem maior que 200 metros.

Figura 6.79 - Carta de distância vertical da drenagem mais próxima da região do Médio Rio Grande.

As áreas urbanas têm alto potencial de escoamento superficial e, por isso, demandam estudos hidrológicos mais detalhados e do uso de sistemas de drenagem de águas pluviais eficientes.

Resultados referentes ao percentual de área ocupado por classe de distância vertical da drenagem (abaixo de 5 metros e entre 5 e 15 metros da drenagem), em áreas urbanizadas, são apresentados no Quadro 6.23. O percentual de área ocupada, por classe de distância vertical da drenagem, em cada macrounidade ambiental, é representado pelo gráfico da Figura 6.80.

Quadro 6.23 - Área de abrangência de regiões com distância vertical da drenagem inferior a 5 e a 15 metros.

Município	Área urbana (km ²)	Área de abrangência na área urbana (km ²)		
		< 5m	5-15m	<15m
Alpinópolis	3,22	0,00	0,00	0,00
Bom Jesus da Penha	0,67	0,05	0,13	0,18
Capetinga	1,27	0,17	0,11	0,28
Cássia	4,03	0,92	0,06	0,98
Claraval	0,59	0,23	0,15	0,39
Delfinópolis	2,88	1,83	0,35	2,19
Fortaleza de Minas	0,60	0,06	0,15	0,21
Ibiraci	4,51	2,12	0,24	2,36
Itamogi	1,60	0,17	0,21	0,38
Itaú de Minas	4,44	1,86	0,90	2,75
Jacuí	1,10	0,23	0,14	0,37
Monte Santo de Minas	0,53	0,00	0,00	0,00
Nova Resende	1,51	0,00	0,00	0,00
Passos	20,30	1,26	1,23	2,49
Pratápolis	1,54	0,44	0,40	0,84
Sacramento	0,42	0,15	0,02	0,17
São João Batista do Glória	1,65	0,22	0,30	0,52
São José da Barra	1,75	0,35	0,15	0,51
São Pedro da União	0,91	0,06	0,14	0,20
São Sebastião do Paraíso	14,90	0,19	0,34	0,53
São Tomás de Aquino	0,93	0,00	0,00	0,00

Em termos de área de abrangência de regiões passíveis de inundação, devem-se destacar as áreas urbanizadas dos municípios de Ibiraci, Itaú de Minas, Delfinópolis, Passos e Cássia.

Nas áreas urbanas de Alpinópolis, Monte Santo de Minas, Nova Resende e São Tomás de Aquino, não foram detectadas regiões com distância vertical igual ou inferior a 5 metros de canais de drenagem de ordem igual ou superior a 4.

Em Delfinópolis e Ibiraci, todas as áreas urbanas que coincidem com áreas passíveis de inundação e/ou áreas com baixos níveis de distância vertical da drenagem

localizam-se às margens do lago de Furnas e estão sob influência da regularização de vazões das barragens hidroelétricas.

As áreas urbanas de Passos, Itaú de Minas, Cássia e Pratápolis são as que possuem as maiores áreas de abrangência de áreas passíveis de inundação localizadas em zonas de centro urbano.

Figura 6.80 - Percentual de área ocupado por classe de distância vertical da drenagem em cada macrounidade ambiental.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

As maiores planícies de inundação localizam-se nas margens do lago de Furnas. Nessas áreas, as cotas de inundação são regularizadas pelas barragens de Furnas, Luís Carlos Barreto e Mascarenhas de Moraes.

Com exceção das macrounidades influenciadas pelo lago, a MB_m[13](8) é a que detém a maior área de abrangência de planícies de inundação. Nesse

compartimento, foram mapeados cerca de 171km² de regiões com distância vertical da drenagem inferior a 5 metros.

Em termos de percentual de área, as macrounidades MB_m[02](5) e MB_m[04](6) são as que têm os maiores percentuais de área ocupados por planícies, apresentando 12 e 9%, respectivamente.

6.3 Análise integrada dos dados, mapas e cartas

6.3.1 Potencial morfométrico às cheias e à regularização de vazão

A morfometria é considerada uma relevante ferramenta de análise dos condicionantes naturais do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Podem-se encontrar inúmeras referências bibliográficas que relacionam parâmetros morfométricos e hidrológicos, tais como: Horton (1945), Smith (1950 apud França, 1968), Straler (1952), Freitas (1952 apud Gandolfi, 1971), Müller (1953), Schumm (1956), Melton (1957 apud Zăvoianu, 1985), Chorley, Malm e Pogorzelski (1957), Strahler (1960), Hack (1957 apud Morisawa, 1962), Morisawa (1962), França (1967 apud Christofolletti, 1969), Schumm (1977 apud Ferreira, 1996), França (1968), Gandolfi (1968), Christofolletti (1969), Christofolletti (1970), Gregory e Walling (1973 apud Ferreira, 1996), Christofolletti (1974), Patton e Baker (1976), Villela e Mattos (1975), Patton e Baker (1976), Christofolletti (1979), Christofolletti (1980), Tavares & Queiroz (1981), Zăvoianu (1985), Patton (1988), Jorge e Uehara (1995), Souza (2006) e Oliveira, Guasselli e Saldanha (2010), Oliveira, Laurino e Saldanha (2010), Collares (2000), Brollo (2001), Brubacher, Oliveira e Guasselli (2011).

Neste estudo, os indicadores morfométricos foram avaliados conforme sua influência potencial no comportamento hidrológico dos cursos d'água com ordem de ramificação igual ou superior a 4.

O intuito dessa análise foi de discretizar as potencialidades das bacias com relação aos processos de cheias e a regularização do fluxo superficial.

Para a avaliação dos parâmetros morfométricos, com base nas referências bibliográficas que descrevem relações entre a morfometria e a hidrologia supracitadas, foram adotados os seguintes pressupostos básicos:

- o tempo de concentração das águas pluviais na bacia é determinado por sua velocidade de escoamento superficial e sua capacidade de regularização de vazão;
- o potencial de escoamento superficial e a capacidade de regularização de vazão são variáveis inversamente proporcionais;
- bacias com rápido tempo de concentração têm íngremes picos de cheia e, normalmente, pequena área de drenagem e baixo volume de descarga;
- bacias com maior área e ordem de drenagem apresentam alto tempo de concentração e elevada capacidade de regularização de vazão;
- bacias com maior área de extensão e ordem de ramificação detêm os maiores volumes de descarga e envolvem grandes áreas de planície de inundação;
- o hidrograma de bacias com maior área de abrangência e ordem de ramificação tem períodos de duração maiores, contém vários picos ou ondas de cheia que são amortizados pela capacidade de regularização da bacia;
- bacias com menor área de abrangência, localizadas em regiões de cabeceira, estão mais sujeitas às cheias relâmpago;
- o hidrograma de bacias com menor área de abrangência ou ordem de ramificação, normalmente, apresenta um único e íngreme pico de cheia;
- há dois tipos de processos predominantes relacionados aos períodos de cheia na região:
 - a) inundação/enchente relâmpago (flash flood/flooding) – causada por transbordamento de canais fluviais presentes nas baixas encostas, em terrenos naturais ou antropizados, com restrita área de abrangência, devido à baixa ordem hierárquica dos canais e a sua acentuada declividade.

- b) inundação da planície (riverine flooding) – transbordamento de canais fluviais sobre os terrenos da planície marginais aos canais, sendo que a abrangência das áreas invadidas pelas águas é diretamente proporcional à ordem hierárquica do canal.

A análise de agrupamento de parâmetros morfométricos das unidades ambientais, quanto às potencialidades hidrológicas, deu-se sobre os três seguintes enfoques básicos:

- cheia relâmpago,
- inundação de planície e
- regularização de vazão.

A metodologia adotada para o agrupamento e a avaliação das unidades ambientais quanto às suas potencialidades hidrológicas seguiu a linha metodológica adotada por Souza (2006), que analisou a suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem quanto ao desenvolvimento de inundações, em regiões costeiras.

Após uma série de testes, optou-se pela adoção de alguns dos parâmetros morfométricos, considerados representativos das potencialidades hidrológicas avaliadas. Para cada parâmetro, as bacias foram reclassificadas em 5 níveis, atribuindo-se valores de 1 até 5, conforme o potencial da bacia.

Através do procedimento supracitado, obteve-se, para cada parâmetro morfométrico, modelos de classificação das bacias hidrográficas quanto ao potencial de ocorrência de cheias relâmpago, de inundação de planície e de regularização de vazões, em 5 classes (de muito baixo a muito alto potencial).

A integração dos atributos para preparação das cartas finais deu-se pela soma dos modelos intermediários aliada à atribuição de pesos aos parâmetros com relação à relevância e à influência de cada parâmetro sobre cada processo. No Quadro 6.24, são mostrados os índices morfométricos considerados e os pesos atribuídos.

As Figuras 6.81, 6.82 e 6.83 apresentam as cartas de classificação das unidades ambientais quanto às suas potencialidades morfométricas ao desenvolvimento de processos de cheias relâmpago, inundação de planícies e regularização de vazões.

Quadro 6.24 - Índices morfométricos considerados influentes sobre os processos hidrológicos avaliados e seus respectivos pesos a cada índice.

Processo hidrológico	Parâmetros morfométricos			
	Diretamente proporcional	Peso	Inversamente proporcional	Peso
Cheia relâmpago	Densidade de drenagem	1		
	Densidade hidrográfica	1		
	Relação de relevo	1	Sinuosidade	1
	Índice de rugosidade	1	Área de contribuição	1
	Relação de bifurcação	1	Coeficiente de manutenção	1
	Índice de circularidade	3	Textura topográfica	1
	Desvio padrão da altitude/área	1		
	Desvio padrão da declividade/área	1		
Inundação de planície	Abrangência de HAND < 5m	2		
	Sinuosidade	2		
	Área de contribuição	2	Coeficiente de manutenção	1
	Densidade de drenagem	1	Textura topográfica	1
	Densidade hidrográfica	1	Relação de relevo	1
	Relação de bifurcação	1	Índice de rugosidade	1
	Índice de circularidade	2		
Regularização de vazão	Variação altimétrica/área	1		
	Abrangência de HAND < 50m	1	Relação de relevo	1
	Sinuosidade	1	Índice de circularidade	1
	Área	1	Densidade hidrográfica	1
	Ordem de ramificação	1	Variação altimétrica/área	1

Figura 6.81 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica às cheias relâmpago.

Figura 6.82 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica às inundações da planície.

Figura 6.83 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica de regularização de vazões.

6.3.2 Potencial de escoamento superficial

O escoamento superficial é considerado uma relevante etapa do ciclo hidrológico. A avaliação desse processo hidrológico englobou a verificação da influência sobre o processo em análise, exercida por componentes do meio físico e pela ocupação territorial.

Na Figura 6.84 é apresentado o fluxograma com as principais etapas metodológicas que envolveram a análise de potencialidades de escoamento superficial.

Figura 6.84 - Fluxograma de aspectos metodológicos relacionados à avaliação do potencial de escoamento superficial e infiltração

A análise de potencialidades de escoamento superficial realizada neste trabalho procurou compreender e pormenorizar os mecanismos que envolvem esse complexo processo de dinâmica das águas sobre a região em estudo.

A princípio, analisaram-se somente aspectos do meio físico. Os produtos cartográficos desta etapa foram as cartas de:

- potencial do meio físico ao escoamento superficial (item 6.3.2.1 e 6.3.2.5) e
- potencial geomorfológico ao escoamento superficial (item 6.3.2.2 e 6.3.2.6)

Em uma segunda etapa, elaborou-se a carta de:

- potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial (item 6.3.2.3)

Vale destacar que ambos os documentos cartográficos elaborados na primeira etapa retratam as potencialidades do meio físico.

A carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial é o principal produto dessa análise, que foi elaborada a partir de procedimentos que vem sendo tradicionalmente aplicados em estudos dessa natureza.

A carta de potencial geomorfométrico é o produto de uma proposta metodológica cujo objetivo é de, na falta ou incerteza a respeito da composição dos materiais terrestres, viabilizar a diferenciação das potencialidades hidrológicas regionais.

A carta de potencial do meio físico e antrópico ao escoamento superficial é considerada como um documento cartográfico ideal para caracterização dos padrões de escoamento da bacia, pois considera, além dos aspectos físicos, a cobertura do terreno. Contudo, devido à dinâmica mudança de padrões de ocupação territorial, esse produto deve ser constantemente atualizado, considerando as contínuas atualizações do mapa de uso e cobertura do terreno.

No item 6.3.2.8, os produtos cartográficos elaborados na primeira etapa foram comparados para fins de verificação e validação cruzada de resultados.

No item 6.3.2.9, comparam-se as cartas de potencial do meio físico e de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial. Esse item busca avaliar mudanças nos padrões de escoamento devido às atividades de uso e ocupação da GD7.

6.3.2.1 Elaboração da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial

Para elaborar a carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial, adotou-se a técnica de atribuição de pesos relativos entre os atributos e planos de informação do meio físico, que tradicionalmente vem sendo adotada em trabalhos desta natureza, conforme a proposta metodológica de Pejon e Zuquette (1993).

Os atributos considerados para a elaboração desta carta foram: ICCD, declividade, geologia e pedologia.

Assim, utilizou-se de um Processo Analítico Hierárquico (AHP) para a definição de pesos das diferentes classes de atributos considerados. Os mapas e as cartas foram reclassificados conforme os pesos definidos pela análise supracitada. A ferramenta utilizada para tal procedimento foi a "*Reclassify*", presente na extensão "*Spatial Analyst*" do software ArcGis10®.

A sobreposição dos planos de informação considerados foi realizada por meio do comando "*Weighted Sum*" da extensão "*Spatial Analyst*" do software ArcGis10®, em que cada atributo recebeu um peso.

Detalhes a respeito dos planos de informação, seus atributos e respectivos pesos podem ser verificados no item 6.3.2.4.

6.3.2.2 Preparação da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial

Os atributos morfométricos e geomorfométricos são amplamente citados e relacionados na literatura como parâmetros que permitem diferenciar padrões hidrológicos relacionados às potencialidades de escoamento superficial e infiltração de água no terreno.

Dessa forma, considerando que a etapa do ciclo hidrológico em questão é um dos processos de maior importância para a compreensão da dinâmica fluvial, procurou-se desenvolver e analisar uma nova técnica para gerar um documento cartográfico que retrate, de forma regionalizada, os padrões de escoamento superficial e infiltração, considerando-se somente atributos geomorfométricos, que podem ser obtidos de forma simples e rápida.

Além disso, os padrões regionais, identificados no conjunto de índices utilizados para produzir a carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial, podem ser considerados como ferramentas que viabilizam a verificação e a validação dos resultados da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

A elaboração da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial envolveu a manipulação dos seguintes produtos cartográficos, obtidos anteriormente:

- carta de índice de concentração de rugosidade (ICR);
- carta de índice de concentração de canais de drenagem (ICCD); e
- carta de índice de concentração de gradientes de canais (ICGC).

Após uma batelada de testes de sobreposição de informações contidas nas matrizes dos índices citados acima, concluiu-se que para a obtenção da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial, devem ser adotados os seguintes procedimentos metodológicos:

- normalização dos índices geomorfométricos básicos (ICR, ICCD e ICGC) para que seus valores variem em uma faixa de 1 a 100;
- soma das matrizes normalizadas e atribuição de peso 2 ao ICR, por representar o atributo de declividade, que é de essencial relevância no processo de escoamento;
- fatiamento da matriz obtida em cinco classes, pelo método de divisão da população em intervalos geométricos, que representam os níveis de muito baixo a muito alto potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.

6.3.2.3 Elaboração da carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial

Além dos atributos considerados na preparação da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial, consideraram-se informações relativas ao uso e ocupação do terreno e a densidade de barramentos naturais e artificiais. A manipulação dos planos de informação e de seus atributos segue uma linha metodológica similar àquela adotada para a produção da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

No item 6.3.2.4, são apresentados os resultados das análises efetuadas sobre cada plano de informação e seus respectivos atributos (análises AHP).

A carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial deve ser considerada como um documento ideal para a avaliação do processo aqui discutido. Contudo, devido à dinâmica das atividades antrópicas, esse é um documento cartográfico que retrata apenas a realidade atual. Assim, essa carta deve ser continuamente atualizada no que se refere às informações de uso e ocupação e de densidade de barramentos.

6.3.2.4 Relação entre atributos dos meios físico, biótico e socioeconômico e o potencial de escoamento superficial

As análises dos níveis potencial de escoamento superficial envolveram um processo analítico hierárquico de atribuição de pesos relativos entre planos de informação e seus respectivos atributos que retratam características físicas, bióticas e socioeconômicas da região estudada.

Nesse item estão apresentadas as análises realizadas sobre cada plano de informação e seus respectivos atributos.

Foram elaboradas duas cartas de potencial ao escoamento superficial lançando-se mão de análises AHP. Uma das cartas considerou apenas os planos de informação relativos ao meio físico, e a outra considerou aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos. Ambas as análises adotaram pesos similares entre os atributos dos planos de informação relativos ao meio físico.

As matrizes AHP com os pesos relativos entre os planos de informação utilizados para a produção das cartas de potencial do meio físico e potencial do meio físico e antrópico ao escoamento superficial são mostradas nas Figuras 6.85 e 6.86, respectivamente. As demais matrizes, referentes a cada plano de informação analisado, são apresentadas nos próximos subitens.

No que se refere apenas aos atributos do meio físico, a declividade foi considerada como o fator que exerce maior controle sobre o processo estudado. O peso atribuído ao referido plano de informação foi de 41%. Aos demais atributos (que representam a capacidade exercida pelos materiais terrestres na geração de escoamento) pedologia, densidade hidrográfica e geologia, foram atribuídos os pesos de 29%, 18% e 11%, respectivamente.

Ao avaliar todos os fatores envolvidos no processo, a declividade e o uso e ocupação do terreno foram considerados como os que exercem a maior influência sobre o escoamento superficial; ambos receberam o peso de 28% (aproximadamente). À pedologia, à densidade hidrográfica e à geologia, foram atribuídos, respectivamente, os pesos de 17%, 13% e 9%. O menor peso foi aplicado ao plano de informação referente à densidade de barramentos (6%).

6.3.2.4.1 Declividade

A declividade é considerada um dos aspectos que exercem maior influência sobre os níveis potenciais de escoamento superficial. Esse fator é diretamente proporcional às taxas de escoamento superficial e inversamente proporcional às taxas de infiltração de água no terreno.

A carta de declividades foi fatiada e reclassificada em 6 níveis de potencial de escoamento superficial, que são mostrados na Tabela 6.10. A matriz AHP de atribuição de pesos as classes de declividade do terreno e a análise de consistência são mostradas na Figura 6.87.

Tabela 6.10 - Níveis de potencial de escoamento superficial segundo a declividade do terreno.

		Declividade (%)
Potencial de escoamento	Muito Alto	> 30%
	↑	20-30%
		10-20%
		5-10%
		2-5%
	Muito Baixo	< 2

Figura 6.87 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de declividade do terreno.

DECLIVIDADE							
POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL						
	<2%	2-5%	5-10%	10-20%	20-30%	>30%	
	<2%	1	1/2	1/3	1/5	1/8	0
	2-5%	2.00	1	2/3	2/5	1/4	1/5
	5-10%	3.00	1.50	1	2/3	2/5	1/3
	10-20%	5.00	2.50	1.50	1	2/3	1/2
	20-30%	8.00	4.00	2.50	1.50	1	2/3
	>30%	10.00	5.00	3.00	2.00	1.50	1
	SOMA	29.00	14.50	9.00	5.77	3.94	2.80

MATRIZ NORMALIZADA							
POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	<2%	2-5%	5-10%	10-20%	20-30%	>30%	AUTO VETOR
	<2%	0.0345	0.0345	0.0370	0.0347	0.0317	0.0357
	2-5%	0.0690	0.0690	0.0741	0.0694	0.0634	0.0714
	5-10%	0.1034	0.1034	0.1111	0.1156	0.1015	0.1190
	10-20%	0.1724	0.1724	0.1667	0.1734	0.1691	0.1786
	20-30%	0.2759	0.2759	0.2778	0.2601	0.2537	0.2381
	>30%	0.3448	0.3448	0.3333	0.3468	0.3805	0.3571

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
n	6	$\lambda_{\text{máx}}$	6.0078	IC	0.0016	ICA	1.24
						RC	0.126%

6.3.2.4.2 ICCD – Índice de Concentração de Canais de Drenagem

Um aspecto considerado de suma importância sobre o potencial de escoamento superficial é a densidade hidrográfica (Dh). Essa variável é diretamente proporcional ao escoamento superficial e retrata o controle sobre a capacidade de infiltração de água exercida pelos materiais terrestres (geologia e pedologia).

O índice de concentração de canais de drenagem na região de estudo varia entre 0 e 8,4 canais/km². Na Tabela 6.11, podem-se notar os intervalos de classe definidos para a reclassificação da matriz de ICCD, quanto aos seus níveis potenciais de escoamento. A matriz AHP de atribuição de pesos às classes, segundo a densidade hidrográfica é apresentada na Figura 6.88.

Vale destacar que, para definir os intervalos de classes aplicados na reclassificação, foi analisada a distribuição estatística dos valores contidos na matriz de ICCD da GD7 e valores adotados na literatura.

Tabela 6.11 - Potencial de escoamento superficial segundo a concentração de canais de drenagem.

Código da classe	Potencial de escoamento	Concentração de canais (canais/km ²)
5	Muito Alto	4-8,4
4	Alto	3-4
3	Médio	2-3
2	Baixo	1-2
1	Muito Baixo	0 - 1

Figura 6.88 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de densidade hidrográfica.

6.3.2.4.3 Geologia

Considerar a distribuição espacial de materiais terrestres é de essencial relevância na determinação da capacidade de infiltração e escoamento superficial.

Na Tabela 6.12, podem-se notar os agrupamentos dos tipos de rochas presentes na área de estudo, conforme o seu potencial de escoamento superficial e infiltração. A matriz AHP da atribuição de pesos aos grupos de rochas é mostrada na Figura 6.89.

De maneira geral, rochas ígneas e metamórficas apresentam baixo potencial de infiltração ao passo que rochas sedimentares apresentam um potencial de infiltração que varia conforme aspectos relacionados à textura e à cimentação.

Tabela 6.12 - Potencial de escoamento superficial dos grupos de rocha.

Código da classe	Potencial de escoamento	Rocha
5	Muito alto	Basalto e diabásio (Formação Serra Geral)
		Gnaiss com intercalações de xisto, quartzito e anfibolito
		Gnaiss e migmatitos com intercalações de anfibolitos ultramáficas e metassedimentos
		Gnaiss e xisto com intercalações de quartzito, anfibolito e rocha calcissilicática
		Gnaiss migmatítico
		Gnaisses com intercalações de xisto, quartzito-xisto, quartzito e anfibolito
		Rochas ultramáficas
4	Alto	Rochas ultramáficas com intercalações de gnaiss e metassedimentos
		Anfibolitos e gnaiss dioríticos
		Arenito (Formação Botucatu) associado áreas com declividade igual ou superior a 20%
		Filito com intercalações ocasionais de quartzito
		Filitos e metadiamectitos
		Folhelho e siltito (Formação Aquidauana)
		Metarenito com intercalações de quartzito-xisto, quartzito, filito, metaconglomerado
		Mica-xisto com intercalações comuns de quartzito
		Mica-xisto com intercalações de quartzito-xisto e quartzito, ocasionalmente lentes de rochas
		Mica-xisto com intercalações de quartzito-xisto, quartzito, anfibolito e gnaiss
		Mica-xisto com ocorrências ocasionais quartzito e lentes de mármore
		Migmatitos e granitóides gnaissificados, graníticos a granodioríticos, localmente com lentes
3	Médio	Rochas calcissilicáticas
		Xisto e filito com ocorrência local de gnaiss e mármore
		Coberturas aluvionares associadas aos Argissolos Vermelho Amarelo
		Coberturas cenozóicas Indiferenciadas associadas aos Argissolos Vermelho Amarelo
2	Baixo	Milonito e localmente, gnaisses associados a rochas ultramáficas
		Arenito, conglomerado (Formação Aquidauana)
		Coberturas aluvionares associadas as classes de Latossolo Vermelho e Vermelho Amarelo
		Coberturas cenozóicas indiferenciadas associadas as classes de Latossolo Vermelho e Vermelho Amarelo
1	Muito Baixo	Quartzito com intercalações de mica-xisto
		Quartzito com intercalações ocasionais de mica-xisto e filito
		Arenito (Formação Botucatu) associado áreas com declividade inferior a 20%

Figura 6.89 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de potencial ao escoamento superficial do terreno exercido pela geologia.

</

6.3.2.4.4 Pedologia

Os principais grupos pedológicos que ocorrem na GD7 são: latossolos vermelhos e vermelhos amarelos, latossolos vermelhos férricos, argissolos vermelhos amarelos, nitossolos vermelhos, neossolos litólicos.

Os latossolos vermelhos e vermelhos amarelos são solos com perfis de alteração profundos, homogêneos, com estrutura fina e porosa e textura predominantemente arenosa. Logo, devido ao grande volume e ao tamanho dos poros, à sua textura e à profundidade, esse tipo de solo possui um potencial de infiltração muito alto.

Os latossolos vermelhos férricos são solos profundos e homogêneos com estrutura fina e porosa; possuem textura predominantemente argilosa. Assim, devido a sua profundidade e estrutura, esse solo tem um alto potencial de infiltração e, por sua textura ser predominantemente argilosa, possui um potencial de infiltração inferior aos latossolos vermelhos e vermelho amarelos.

Os argissolos vermelho amarelos caracterizam-se por ter um perfil profundo e desenvolvido e diferenciam-se dos latossolos por apresentar o horizonte superficial (A) com textura predominantemente arenosa que passa abruptamente para horizonte sub-superficial (B) argiloso e deste para horizonte (C) argilo-silto-arenoso. Assim, os argissolos constituem solos heterogêneos, com clara diferenciação entre os horizontes e têm uma condutividade hidráulica média devido à textura dos horizontes (B) e (C).

Os nitossolos vermelhos são derivados de rochas básicas e ultramáficas, ricas em minerais de ferro magnesianos e, conseqüentemente, têm elevada capacidade de troca catiônica. Estão localizados em relevo íngreme e sua textura varia de argilosa a muito argilosa e têm porosidade elevada. Dessa forma, em função de sua posição no relevo e sua textura, esses solos apresentam baixa condutividade hidráulica.

Os neossolos litólicos são solos jovens, pouco espessos e, frequentemente cascalhentos, com alto teor de silte e, conseqüentemente, baixa permeabilidade. São caracterizados como uma fina camada arenosa-orgânica que recobre diretamente a rocha com baixo a moderado nível de alteração. Logo, devido a sua baixa espessura, a condutividade hidráulica dos neossolos litólicos é condicionada pelo substrato rochoso. Ou seja, quando associados a arenitos não silicificados, esses solos apresentam um alto potencial de infiltração e, quando associados a basaltos e diabásios, apresentam baixo potencial de infiltração.

Os agrupamentos e as classificações dos níveis potenciais de escoamento superficial com relação à pedologia são apresentados na Tabela 6.13. A Figura 6.90 mostra a matriz AHP de atribuição de pesos aos grupos pedológicos.

Tabela 6.13 - Potencial de escoamento superficial dos grupos de solos.

Código de classe	Potencial de escoamento	Solos
5	Muito Alto	NeossolosLitólicos associados aos Grupos Geológicos 1 e 2
4	Alto	Nitossolos Vermelhos NeossolosLitólicos associados ao Grupo Geológico 3 e 4
3	Médio	Argissolos Vermelhos Amarelos NeossolosLitólicos associados ao Grupo Geológico 5
2	Baixo	Latossolos Vermelhos Férricos
1	Muito Baixo	Latossolo Vermelho e Vermelhos Amarelos

Figura 6.90 - Matriz AHP de atribuição de pesos as classes de potencial ao escoamento superficial do terreno exercido pela pedologia.

POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

3

4

5

1

2

6.3.2.4.5 Uso e Ocupação

A cobertura do terreno é uma das principais condicionantes sobre os coeficientes de deflúvio.

Há casos em que a cobertura do terreno condiciona as máximas taxas de escoamento superficial, como em áreas urbanas, por exemplo. Por outro lado, algumas atividades de uso e ocupação do terreno retêm o escoamento superficial e promovem a regularização do fluxo hídrico superficial, como é o caso de barramentos e matas.

A Tabela 6.14 apresenta os grupos de classes de uso e ocupação relacionados aos seus níveis de potencial de escoamento superficial. Na Figura 6.91, é mostrada a matriz AHP de atribuição de pesos aos níveis de potencial de escoamento superficial das classes de uso e ocupação do terreno.

Tabela 6.14 - Classes de potencial de escoamento superficial conforme o uso e ocupação.

Código	Potencial ao Escoamento	Categorias Hierárquicas (mm)
1	Muito Baixa	Mata, Silvicultura, Barramento
2	Baixa	Campo, Cultura Permanente
3	Média	Cultura Anual, Pastagem
4	Alta	Aterro, Solo Exposto, Estrada
5	Muito Alta	Área Urbana

Figura 6.91 - Análise AHP das classes referentes ao atributo uso e ocupação, quanto ao potencial de escoamento superficial e infiltração.

6.3.2.4.6 Densidade de barramentos

Os barramentos são estruturas com elevada capacidade de retenção do escoamento superficial e, conseqüentemente, regularização de vazões. Por isso, esse aspecto deve ser considerado em avaliações relativas ao potencial de escoamento superficial.

A densidade de barramentos das bacias hidrográficas, da região do Médio Rio Grande, varia entre 0 e 1,49. A reclassificação desse documento cartográfico deu-se por

meio do algoritmo “Natural Breaks”. Os intervalos de valores obtidos pela reclassificação e do mapa de densidade de barramentos são mostrados na Tabela 6.15. A matriz AHP de atribuição de atribuição de pesos as classes pode ser notada na Figura 6.92.

Tabela 6.15 - Classes de potencial de escoamento superficial a densidade de barramentos de cada unidade ambiental.

Código	Potencial ao Escoamento	Densidade de barramentos
1	Muito Baixa	0,48 – 1,49
2	Baixa	0,15 – 0,48
3	Média	0,05 – 0,15
4	Alta	0,01 – 0,05
5	Muito Alta	0 – 0,01

Figura 6.92 - Análise AHP das classes referentes ao atributo densidade de barramentos, quanto ao potencial de escoamento superficial e infiltração.

6.3.2.5 Resultados de potencial do meio físico ao escoamento superficial

A carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial consta na Figura 6.93 e no Apêndice G.

Figura 6.93 - Carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

A maior concentração de elevados níveis de potencial de escoamento ocorre na porção nordeste da área de estudo, envolvendo a região da Serra da Canastra e em suas adjacências.

Na porção dos afluentes do rio São João (na porção sul da área de estudo) também se notam regiões expressivas com altos níveis de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

As menores taxas potenciais de escoamento concentram-se em áreas de baixa declividade e materiais terrestres permeáveis, que se localizam principalmente:

- na região da Bacia Sedimentar do Paraná (porção oeste da área de estudo);
- em áreas cujo substrato rochoso é formado por coberturas quaternárias;
- nas regiões marginais ao lago a montante da UHE de Marechal Mascarenhas de Moraes; e
- em platôs localizados na Serra da Fortaleza e na Serra do Chapadão (divisa entre os municípios de Fortaleza de Minas e São Sebastião do Paraíso) e no extremo norte da região do Médio Rio Grande.

Na Figura 6.94, são apresentados os gráficos de percentual de área ocupada, por classe de potencial de escoamento, nas macrounidades ambientais e nos municípios.

As macrounidades MB_m[07](5), MB_m[01](5), MB_m[04](6), MB_m[03](6) e MB_m[05](5) apresentam os maiores níveis de potencial do meio físico ao escoamento superficial. Os referidos compartimentos ambientais apresentam percentuais de área ocupada pelas classes alto e muito alto de 50,02%; 49,38%; 46,36%; 43,22% e 42,40%, respectivamente.

As macrounidades que têm o maior percentual de áreas ocupadas por níveis de muito baixo e baixo potencial do meio físico ao escoamento superficial são: MB_m[10](5) (70%), MGU_b[20](4) (69%), MGU_b[21](4) (68,9%), MGU_m[27] (68,7%), MB_b[19](6) (67,4%), MB_b[18](5) (67%) e MGU_m[24] (66,7%).

Figura 6.94 - Percentual de área ocupada por classe de potencial do meio físico ao escoamento superficial nas macrounidades ambientais e nos municípios.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Com relação aos municípios, podem-se destacar Fortaleza de Minas, Jacuí, São Roque de Minas, como os que apresentam os maiores níveis de percentual de área ocupada por classes de alto e muito alto potencial do meio físico ao escoamento superficial. Itamogi, São Tomás de Aquino, Monte Santo de Minas e São José da Barra apresentam a maior parte de suas áreas ocupadas pelas classes muito baixo e baixo.

As unidades ambientais U[04]4(01), U[31]4(01), U[15]4(09), U[04]4(03), U[03]4(07), U[13]4(39) e U[04]4(12)] são as que apresentam os maiores níveis de potencial do meio físico ao escoamento superficial, e as unidades U[04]6(01), U[19]6(01), U[18]5(03), U[14]4(02 e U[23]4(01) são as que apresentam os menores.

6.3.2.6 Resultados de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial

A carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial é apresentada na Figura 6.95 e no Apêndice H.

Por análise da referida carta, no que diz respeito aos índices básicos (ICR, ICGC e ICR) considerados, pode-se afirmar que:

- o índice de concentração de rugosidade representa o potencial de escoamento relacionado às encostas (ao relevo);
- o índice de concentração de gradiente de canais expressa o potencial de escoamento da rede de drenagem (energia hidráulica dos canais de drenagem);
- o índice de concentração de canais de drenagem mostra a quantidade de canais disponíveis para escoamento superficial e, conseqüentemente, o controle exercido pelos materiais terrestres sobre a capacidade de infiltração de água no terreno.

As regiões com níveis alto e muito alto têm maior alcance na porção à direita das margens do lago. Já as regiões com níveis muito baixo e baixo ocorrem principalmente na região que envolve formações rochosas da Bacia Sedimentar do Paraná (porção oeste da área de estudo).

Figura 6.95 - Carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.

6.3.2.7 Comparação de resultados obtidos nas cartas de potencial geomorfométrico e de potencial do meio físico ao escoamento superficial

Este item compara os resultados obtidos nas cartas que avaliam o potencial de escoamento superficial relativo aos fatores físicos às cartas de:

- potencial do meio físico ao escoamento superficial e;
- potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.

Na Figura 6.96 são apresentadas as cartas de potencial do meio físico e de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial. Nessa figura, são mostradas duas formas de fatiamento da população de valores obtidos nas matrizes, segundo intervalos geométricos e quantis.

Como citado no item 6.3.1:

- a carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial (Figura 6.96(b) e (d) e Apêndice G) consiste em um produto cartográfico elaborado a partir de métodos tradicionais e
- a carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial (Figura 6.96 (a) e (c) e Apêndice H) é produto de uma nova proposta metodológica que deve viabilizar uma avaliação prévia de regiões com distintos padrões hidrológicos e a validação da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

Percebe-se que há boa compatibilidade visual (em termos de distribuição espacial) entre ambos os documentos cartográficos. A carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial origina unidades mais fragmentadas, ou seja, essa carta tem maior nível de detalhamento.

A carta de potencial geomorfométrico gera grupos de regiões com tipologias hidrológicas homogêneas, agrupadas segundo distintos padrões geomorfométricos. Dessa maneira, a carta de potencial geomorfométrico retrata uma tendência do comportamento hidrológico da área, com unidades mais regionalizadas, ou seja, com menor detalhamento em comparação à carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

Figura 6.96 - Comparação entre as cartas de potencial de escoamento superficial, geradas conforme diferentes metodologias, entre as diferentes formas de divisão das matrizes em classes segundo a distribuição da população de valores.

Na Figura 6.97 estão expostos os gráficos que indicam o percentual de cada classe, da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial, contida em cada classe da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial. Os gráficos

comparam as classes potenciais, segundo a divisão da população de valores obtidos em quantis (Figura 6.97(a)) e em intervalos geométricos (Figura 6.97 (b)).

Figura 6.97 - Gráficos que representam o percentual de classes das cartas de potencial do meio físico ao escoamento superficial que estão contidas nas diferentes classes da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial, segundo as divisões da população de valores em quantis (a) e em intervalos geométricos (b).

Ao analisar os gráficos, percebe-se uma boa compatibilidade numérica, entre as classes de potencial de escoamento superficial das cartas geradas pelo método tradicional em comparação à metodologia de potencial geomorfométrico.

No gráfico da Figura 6.97 (b), nota-se que 89% da classe de muito alto potencial geomorfométrico ao escoamento é ocupada pelas classes de muito alto (45%) e alto (44%) potencial do meio físico ao escoamento.

Aproximadamente 89% da classe de muito baixo potencial geomorfométrico ao escoamento é ocupada pelas classes muito baixo (63%) e baixo (26%) potencial do meio físico ao escoamento superficial.

Percebe-se também que o método da divisão em intervalos geométricos promove maior compatibilidade entre os resultados obtidos nas duas cartas de potencial ao escoamento superficial.

Isso demonstra que o novo método proposto promove uma regionalização dos padrões de escoamento identificando grandes áreas com potencial semelhante ao escoamento superficial.

O método de divisão da população em quantis realça as divisões em valores médios; contudo, agrupa muito os valores mediantemente altos a muito altos. A divisão da matriz que cria quebras de classes baseada em intervalos geométricos tem um resultado cartograficamente mais equilibrado.

Pode-se notar que há maior compatibilidade dos modelos cujas classes são divididas em intervalos geométricos em relação aos modelos com fatiamento em quantis.

A carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial tem a capacidade de retratar áreas com diferenças significativas quanto ao processo estudado, tanto devido a aspectos relativos às diferentes respostas hidrológicas das variadas formas de relevo, quanto àqueles relativos aos diferentes materiais terrestres (rochas e solos).

A proposta metodológica aqui apresentada consiste em uma boa alternativa, considerando-se que:

- lança mão de geotecnologias, de fácil e rápida aplicação;
- permite o reconhecimento/diferenciação de padrões hidrológicos regionais;
- obtém-se uma matriz em que, cada célula representa o padrão espacial da variação morfométrica; e
- permite uma verificação/validação cruzada da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

Dessa forma, pela boa compatibilidade entre os modelos, pode-se verificar/validar a carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

Além disso, pode-se afirmar, com um bom grau de confiabilidade, que os produtos cartográficos aqui apresentados retratam e diferenciam regiões com diferentes níveis potenciais de escoamento superficial.

6.3.2.1 Resultados de Potencial dos Meios Físico e Antrópico ao escoamento superficial

A carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial consta na Figura 6.98 e no Apêndice I.

Os gráficos da Figura 6.99 mostram a abrangência das classes de potencial ao escoamento superficial por macrounidade ambiental e por município.

De maneira geral, os padrões gerais de distribuição das potencialidades de escoamento superficial por macrounidade e por município são similares àqueles verificados na carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

Notam-se mudanças pontuais nos padrões de escoamento da área em função de fatores relacionados à cobertura do terreno e à densidade de barramentos. A análise de mudanças em função de tais fatores é apresentada no item 6.3.2.2.

Figura 6.98 - Carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial.

Figura 6.99 - Percentual de área ocupada por classe de potencial do meio físico ao escoamento superficial nas macrounidades ambientais e nos municípios.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

6.3.2.2 Análise de mudanças nos padrões de escoamento devido à cobertura do terreno

A Figura 6.100 mostra as cartas de potencial ao escoamento superficial, ora considerando apenas aspectos do meio físico, ora ponderando adicionalmente aspectos de uso e ocupação do terreno.

Figura 6.100 - Percentual de área ocupada por classe de escoamento superficial na área de estudo, ora considerando o meio físico, ora considerando os meios físico e antrópico.

A análise dos referidos documentos cartográficos permite verificar que nessa área há ocorrência de variadas taxas potenciais de escoamento superficial. Seus níveis potenciais variam de muito baixos a muito altos.

As áreas com maior concentração de níveis potenciais de escoamento superficial elevado ocorrem na porção nordeste da área de estudo, abrangendo a região da Serra da Canastra e em suas adjacências. Nessas áreas, dominam declividades elevadas, altos níveis de densidade de canais de drenagem, materiais terrestres com baixa capacidade de infiltração, formações vegetais campestres e baixa ocorrência de barramentos.

Outra região, com expressiva concentração de altos níveis potenciais de escoamento superficial, é a bacia hidrográfica do rio São João, localizada na região sul da área de estudo. A referida área apresenta condições de muito alta densidade de canais de drenagem, materiais geológicos com baixo potencial de infiltração, e altos níveis de concentração de rugosidade. Contudo, seus potenciais de escoamento

apresentam decréscimos pela presença de áreas florestais, regiões de plantio de café e a presença de barramentos.

Em análise do gráfico de quantificação dos percentuais de classes de potencial ao escoamento superficial na área de estudo (Figura 6.100), nota-se que, ao considerar o fator uso e ocupação, há uma redução dos níveis de potencial de escoamento muito baixo e um pequeno acréscimo das classes de potencial de escoamento muito alto.

O gráfico apresentado na Figura 6.101 mostra os percentuais de área que cada nível de potencial ao escoamento superficial ocupa em cada grupo de atividades de uso e ocupação do terreno.

Figura 6.101 - Percentual de área ocupada por níveis de potencial do meio físico ao escoamento superficial em grupos de classes de uso e ocupação do terreno.

Nota-se que nas áreas urbanas predominam as classes muito baixo e baixo potencial de escoamento superficial relacionado ao meio físico (82%). Nessas regiões, devido à impermeabilização do solo, há elevados acréscimos nas taxas de escoamento superficial.

Em porções do terreno com ocorrência de mata, silvicultura, campo e cafeicultura, predominam potenciais de escoamento médio a muito alto. Nelas, há atenuação dos níveis potenciais de escoamento exercidos pelas referidas formas de uso e ocupação.

Na Figura 6.102 (a) e (b), são apresentadas as cartas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de potencial de escoamento superficial

(potencial físico e antrópico e potencial físico) da área de abrangência da unidade ambiental e das suas respectivas bacias de contribuição.

Para a verificação dos efeitos globais que o uso e ocupação do terreno gera sobre as bacias hidrográficas que compõem a área de estudo, é apresentada a carta da Figura 6.102 (c). Esse documento cartográfico consiste na carta de classificação das unidades quanto às potenciais alterações (acréscimos e decréscimos) sobre os níveis potenciais de escoamento superficial.

Nota-se que os maiores decréscimos ocorrem na porção sul da área de estudo. Isso ocorre devido a sua expressiva concentração de barramentos, matas e atividades de cafeicultura.

Já os maiores acréscimos são aleatoriamente distribuídos ao longo da área de estudo e, geralmente, devido à ocorrência de áreas urbanas e à presença de áreas de solo exposto e pastagem.

Figura 6.102 - Cartas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de escoamento superficial e quanto às alterações no potencial de escoamento devido à cobertura do terreno.

6.3.3 Demandas hídricas

A avaliação dos padrões de consumo de água, na região estudada, seguiu conceitos relacionados à denominada “pegada hídrica”.

A “pegada hídrica” é um indicador quali-quantitativo formado pela soma dos seguintes componentes: WF azul, WF verde e WF cinza. Sendo que:

- o componente WF azul indica o uso consuntivo de águas superficiais e subterrâneas;
- o componente WF verde indica a parcela da precipitação que é retida pelo solo e consumida pela vegetação e que pode ser definida por meio de estimativas de evapotranspiração e
- o componente WF cinza indica os níveis de poluição sobre os recursos hídricos, sendo que a poluição pode ser de origem difusa e pontual.

Conceitos relacionados à pegada hídrica são apresentados por Hoekstra (2003), Rodrigues e Mendiondo (2013). No Quadro 3.9, nota-se que estudos dessa natureza já foram realizados por diversos pesquisadores, em diversas partes do mundo.

Neste trabalho, foram estimadas as componentes de demanda hídrica verde, azul e cinza. Os principais aspectos metodológicos das estimativas e os padrões de demanda hídrica da região são apresentados nos itens a seguir.

6.3.3.1 Verde

A demanda hídrica verde foi estimada a partir de modelos de evapotranspiração potencial mensal e anual.

Neste trabalho propõe-se a estimativa da evapotranspiração potencial das bacias hidrográficas considerando-se os seguintes modelos físicos e aspectos:

- os modelos de distribuição e magnitude anual da radiação global e possíveis decréscimos de evapotranspiração devido a aspectos de sombreamento de relevo;
- o modelo de evapotranspiração horária (gerado a partir do balanço de radiação à superfície – SEBAL), e variações espaciais relativas ao balanço de radiação na área, o fluxo de calor no solo, a temperatura à superfície e o albedo à superfície;

- os modelos de evapotranspiração potencial mensais e anual, gerados a partir da interpolação de dados pontuais, que consideram a variação da temperatura atmosférica da região;

Os aspectos metodológicos adotados, relativos à manipulação dos modelos supracitados para a obtenção de modelos mensais e anuais de taxas de evapotranspiração foram:

1. os resultados de evapotranspiração horária variaram entre 0,3 e 1,1 mm/hora. Tomando-se 1,1 como o máximo, correspondente a 100%, o mínimo valor corresponde a 27%. Assim a matriz de evapotranspiração horária foi normalizada para que os valores que variavam de 0,3 a 1,1 passassem a variar para valores entre 27% a 100%;
2. as populações de resultados obtidos nas matrizes de radiação global mensal e anual foram fatiadas em 3 níveis potenciais, por meio do algoritmo natural breaks;
3. a atribuição de valores às classes de baixo, médio e alto potencial de radiação, com valores de 60%, 90% e 100%, respectivamente, os referidos pesos correspondem a relação entre a média da população de valores de cada classe e o valor máximo de radiação na área estudada; e
4. a obtenção de modelos mensais e anual de evapotranspiração potencial por meio do procedimento matemático e computacional de multiplicação entre:
 - as matrizes de evapotranspiração horária normalizadas,
 - as matrizes reclassificadas de radiação global e
 - os modelos de evapotranspiração potencial mensal e anual (gerados a partir de interpolações de dados pontuais).

6.3.3.2 Azul

A demanda hídrica azul foi estimada a partir de dados inventariados nos seguintes trabalhos de iniciação científica, incluídos no projeto “Grande Minas – União Pelas Águas”:

- levantamento e cadastro de usuários de recursos hídricos regularizados e não-regularizados (CARVALHO et al, 2012) e
- diagnóstico de situação do abastecimento de água e esgotamento sanitário (SASSO, 2010).

O levantamento e o cadastro de usuários obtiveram como resultado um banco de dados georreferenciados de usuários de recursos hídricos superficiais e sub-superficiais com uma série de características de cada ponto de captação cadastrado.

Considerando-se a finalidade do gerenciamento de recursos hídricos, o estudo de demandas hídricas azuis deve:

- a) localizar e caracterizar os pontos de captação de recursos hídricos;
- b) caracterizar o perfil de usuários por bacia hidrográfica;
- c) caracterizar o tipo de uso do recurso hídrico por ponto de captação; e
- d) diagnosticar, por ponto, a vazão e o período de captação de água (horas/dia, dias/mês, mês/ano) de modo a viabilizar a estimativa do volume captado por mês por ponto de captação e por bacia hidrográfica.

Neste trabalho, foi estimada a demanda hídrica azul por ponto de captação e por unidade ambiental (considerando-se o consumo das unidades ambientais a montante). Contudo, em função do tempo e do formato dos dados disponíveis, foram estimados apenas os volumes de captação com frequência anual.

Consideraram-se apenas os pontos cadastrados que se enquadram em classes consideradas como de uso consuntivo da água. As categorias de uso consideradas como consuntivas foram:

- a) dessedentação de animais;
- b) consumo humano;
- c) abastecimento público;
- d) industrial;
- e) lavagem de veículos;
- f) pulverização de café; e

g) irrigação.

A demanda de água consiste na vazão retirada, ou seja, a água captada destinada a atender os diversos usos consuntivos. Segundo Conejo (2005), além da informação referente às retiradas, deve-se prever o volume de água que é efetivamente consumido.

A estimativa da demanda hídrica azul foi realizada em termos de volumes anuais de retirada e de consumo. Para efetuar tal estimativa, adotaram-se critérios e parâmetros de correlação entre os tipos de uso e seus respectivos coeficientes de retirada e consumo. Os critérios e parâmetros adotados variaram em função:

- do tipo de uso consuntivo;
- da disponibilidade de dados; e
- da disponibilidade de informações de correlação entre os dados e o tipo de uso.

Detalhes relativos aos critérios adotados para a estimativa por tipo de uso consuntivo são mostrados nos subitens a seguir.

Os pontos e seus respectivos pesos relativos à demanda hídrica azul foram acoplados ao Geodatabase. Para cada unidade ambiental efetuou-se a soma dos pontos de demanda hídrica de toda sua área de contribuição, o valor obtido foi dividido pelo valor da área da bacia de contribuição.

A partir dos resultados, quantificados por unidade ambiental, cada uma foi classificada quanto ao seu nível de demanda hídrica azul.

6.3.3.2.1 Dessedentação de animais

A demanda hídrica, relacionada à dessedentação de animais, foi estimada a partir do tipo e da quantidade de animais por ponto cadastrado e seus coeficientes de consumo, citados por Telles (2005), GAMA (2009), SUDERHSA (apud IGAM, 2010), IGAM (2010) e Palhares et al. (2005).

A captação de água e o consumo por tipo de animal são mostrados no Quadro 6.25. O coeficiente de consumo adotado foi de 80% conforme o proposto por Conejo (2005).

Quadro 6.25 - Captação e consumo de água por tipo de animal.

Animal	Captação	Consumo
Bovino associado à produção leiteira	55 L/bovino.dia	44 L/bovino.dia
Bovino não associado à produção leiteira	40 L/bovino.dia	32 L/bovino.dia
Suíno	16 L/suíno.dia	12,8 L/suíno.dia
Ave	0,23 L/ave.dia	0,18 L/ave.dia
Equino	50 L/equino.dia	40 L/equino.dia

6.3.3.2.2 Consumo humano

Ponderou-se que a captação média por pessoa é de 200L/dia, conforme valores citados por Palhares et al. (2005), ANA (2003) apud Conejo (2005) e IGAM (2010). O coeficiente de retorno e consumo são de aproximadamente 50%, conforme o indicado por Conejo (2005).

6.3.3.2.3 Abastecimento público

Consideraram-se os seguintes aspectos para a estimativa do volume de captação diária, por ponto cadastrado:

1. vazão outorgada e tempo de captação e população atendida do cadastro de usuários;
2. vazão e tempo de captação do cadastro de pontos de captação de água para abastecimento urbano dos municípios da região do Médio Rio Grande;
3. estimativa de consumo por município considerando-se a população rural e urbana e considerando-se que o consumo varia numa faixa entre 150 e 350L/hab.dia e,
4. considerando-se que o consumo deve variar entre 150 e 350L/hab.dia, efetuou-se uma verificação entre o volume de captação por dia e a demanda da população municipal.

Adotou-se que 80% do volume captado retorna como efluentes e que 20% é efetivamente consumido, conforme o citado por Conejo (2005).

6.3.3.2.4 Consumo industrial

Para usos industriais, optou-se por estimar a demanda hídrica a partir de dados de vazão outorgada. Isso se justifica pelos seguintes fatos:

- há uma grande variabilidade de tipos de uso industrial e
- no banco de dados de usuários, todos os cadastros com finalidade de uso industrial apresentam dados relativos à vazão outorgada.

Conejo (2005) e ANA (2012) indicam que o coeficiente de consumo médio de atividades industriais no Brasil é de aproximadamente 20%. Contudo, esses coeficientes apresentam uma grande variabilidade em função do tipo de atividade industrial.

Dessa forma, tomando-se por base os valores percentuais de consumo em relação à retirada indicados por FBB, MMA e FUNARBE (2011), foram considerados os coeficientes de consumo segundo setores de atividade industrial (Tabela 6.16).

Tabela 6.16 – Coeficiente de consumo de atividades industriais.

Atividade industrial	Coeficiente de consumo
Abatedouro/Matadouro	15%
Alimentícia	25%
Alimentícia/Laticínio	5%
Construção civil	95%
Envasamento de água	95%
Beneficiamento e extração mineral	40%
Química	65%
Química/curtume	5%
Vestuário/lavanderia	20%
Outras	20%

6.3.3.2.5 Lavagem de veículos

As demandas significativas de água cuja finalidade de uso é a limpeza estão concentradas no setor industrial. Dessa forma, adota-se que a estimativa das referidas demandas estão embutidas na avaliação de demandas do setor industrial.

A lavagem de veículos, entretanto, é associada aos postos de combustíveis e às atividades industriais e agroindustriais. Dessa forma, efetuou-se a estimativa de demandas hídricas da lavagem de veículos não associadas às atividades industriais.

A adoção de parâmetros, relativos ao consumo por veículo e o coeficiente de retorno, considerou aspectos citados por Morelli (2005) e Tabosa (2003). Conforme os autores o consumo diário de água é de:

- 400 a 600 litros para lavagem de veículos de grande porte e
- 150 a 250 litros para a lavagem de automóveis.

Vale destacar que, com as tecnologias de tratamento e reuso da água, o consumo de água pode ser reduzido em até 80%. Ou seja, o consumo de água de veículos de grande porte pode variar entre 80 e 600 litros e de automóveis entre, 30 e 250 litros.

Assim, adotou-se um valor médio de consumo de 240 litros por veículo sendo que 80% desse volume é de retorno e 20% é efetivamente consumido.

6.3.3.2.6 Pulverização de café

Os parâmetros adotados para a estimativa de demandas hídricas relacionadas à pulverização de café seguiram:

- os padrões de consumo observados no cadastro de usuários;
- as recomendações realizadas por CETCAF (2013); e
- as informações pessoais com produtores de café da região.

As pulverizações têm a finalidade de aplicação de nutrientes, fungicidas, inseticidas e herbicidas, quando necessário. Em geral, são realizadas 4 pulverizações ao longo do ano, para cada pulverização, em geral, utiliza-se um volume de 4m³/ha. Dessa forma, o consumo de água para fins de pulverização é em torno de 16m³/ha.ano.

A lavagem de café depende do tipo de sistema adotado. Atualmente, adotam-se sistemas com recirculação total ou parcial de água de lavagem. O coeficiente de consumo adotado para essa finalidade foi de 200L/ha.ano.

Os coeficientes de retorno, considerados, foram de 20% para pulverização e de 80% para lavagem de café.

6.3.3.2.7 Irrigação

Os volumes anuais de consumo na irrigação foram estimados a partir de parâmetros de demanda hídrica total anual por hectare ocupado por tipo de cultura agrícola. Os coeficientes adotados seguem indicações de INE (2011); o Quadro 6.26 apresenta os valores adotados em função do tipo de cultura agrícola.

Quadro 6.26 - Consumo de água em função de diferentes culturas agrícolas irrigadas.

Cultura	m³/ha.ano	Cultura	m³/ha.ano
Banana	5465	Horticultura	4281
Batata	4756	Milho	4155
Café	4738	Milho e Feijão	6359
Campo de futebol	5873	Pastagem	5873
Feijão	2204	Tomate	1899
Fruticultura	5465	Viveiro	4966
Grãos	4492		

6.3.3.3 Cinza

Para estimar as cargas poluidoras de uma bacia hidrográfica devem-se considerar as origens pontual e difusa, sendo que:

- as cargas poluidoras de origem pontual referem-se aos resíduos de origem humana, doméstica e industrial e
- as cargas poluidoras de origem difusa são devido aos processos naturais e as atividades humanas, cujo transporte se dá através do escoamento superficial e subterrâneo. Os principais responsáveis são processos erosivos e produtos agroquímicos.

Nessa análise, consideraram-se tanto as cargas poluidoras de origem pontual quanto as difusas. Os procedimentos metodológicos são descritos nos itens (a e b), a seguir. Os resultados dos referidos processos foram as cartas de:

- classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de poluição difusa e
- classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de poluição pontual.

A conclusão da análise de demandas hídricas cinzas deu-se pela preparação da carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de demanda hídrica cinza. Esse produto cartográfico foi obtido a partir da média entre os resultados das classificações, por unidade ambiental, quanto aos níveis de poluição pontual e difusa.

- a) Estimativa da demanda hídrica cinza de origem difusa

Para estimar os níveis de poluição difusa, adotaram-se procedimentos metodológicos propostos por Munafò et al. (2005) e posteriormente utilizados por Cecchi (2007) e Haupt (2009). Nos referidos trabalhos, os autores estimaram o índice PNPI (*Potential Non-point Pollution Index*) a partir de indicadores relacionados a:

- atividades de uso e ocupação (LCI – Land Cover Indicator)
- escoamento superficial (ROI – Run-Off Indicator) e
- distância do corpo hídrico (DI – Distance Indicator).

Nesta avaliação, além dos indicadores supracitados, utilizou-se um indicador de potencial do meio físico à erosão do solo.

Os indicadores, os atributos de cada indicador e os pesos considerados para a elaboração da carta de índice de potencial de poluição não pontual constam no Quadro 6.27.

A partir da carta de índice de potencial de poluição não pontual, procedeu-se à quantificação do percentual de áreas ocupadas por níveis médios a muito altos. A quantificação foi realizada por unidade ambiental, considerando-se também a bacia de contribuição da unidade ambiental.

A seguir, as unidades ambientais foram classificadas quanto ao percentual de área ocupada por níveis médios a muito altos de potencial de poluição não pontual.

Quadro 6.27 - Pesos dos indicadores e atributos considerados na estimativa do índice de potencial de poluição não pontual (PNPI).

Indicador	Peso	Atributo	Peso
Uso e ocupação <i>(LCI - Land Cover Indicator)</i>	4,5	Área urbanizada	9,0
		Cultura anual	9,0
		Disposição de resíduos sólidos	8,0
		Mineração	7,5
		Estrada	6,0
		Cultura permanente	6,0
		Solo exposto	4,0
		Pastagem	4,0
		Silvicultura	3,0
		Campo	2,0
		Mata	0,5
Escoamento superficial <i>(ROI - Run-Off Indicator)</i>	1,5	Muito alto	10,0
		Alto	7,0
		Médio	4,0
		Baixo	1,0
		Muito baixo	0,5
Distância da rede de drenagem <i>(DI - Distance Indicator)</i>	2,5	100 m de todos os canais	10,0
		200 m de canais de ordem ≥ 3	8,0
		500 m de canais de ordem ≥ 5	6,0
		1000 m do lago	3,0
		Demais áreas	0
Suscetibilidade a erosão	1,5	Muito alta	10,0
		Alta	7,0
		Média	4,0
		Baixa	1,0
		Muito baixa	0,5

b) Estimativa da demanda hídrica cinza de origem pontual

A análise de cargas poluidoras de origem pontual deu-se por meio da avaliação dos dados do cadastro de usuários, de Carvalho et al. (2012) e do levantamento de pontos de lançamento de esgoto dos municípios da região, efetuado por Sasso (2010).

Os referidos dados foram analisados quanto à existência de despejos potencialmente poluidores de recursos hídricos, presentes no banco de dados do cadastro de usuários, e

quanto ao índice de esgotamento sanitário dos pontos de lançamento de esgoto cadastrados por município.

Os pontos de despejos foram inseridos no Geodatabase. Para cada unidade, efetuou-se a soma dos pontos de despejo de toda a sua área de contribuição; o resultado foi dividido pela área da bacia de contribuição da unidade ambiental.

Os resultados quantificados por unidade ambiental foram classificados em 6 níveis, de muito baixa a muito alta demanda hídrica cinza devido a cargas poluidoras de origem pontual.

6.3.3.1 Padrões de demanda hídrica verde

Na Figura 6.103, pode-se notar o modelo de evapotranspiração potencial, resultado dos procedimentos descritos no item 6.3.3.1.

Neste modelo, optou-se pela terminologia referente a taxas potenciais, pois, para estimar a evapotranspiração real, ainda há a necessidade de considerar períodos de deficiência hídrica no sistema solo-vegetação.

Figura 6.103 - Mapa de evapotranspiração potencial.

A evapotranspiração real, média da bacia, provavelmente apresenta valores um pouco abaixo dos resultados apresentados, devido aos decréscimos de evapotranspiração em períodos do ano com maior deficiência hídrica, como é o caso dos meses de junho, julho e agosto.

As perdas de água potenciais por processos de evapotranspiração da região do Médio Rio Grande variam entre 160 e 1221 mm/ano. Na média, a evapotranspiração potencial anual é de 787mm.

As mínimas taxas potenciais de evapotranspiração ocorrem em regiões de solo exposto e com baixos níveis de temperatura média, já as máximas ocorrem em regiões com alta densidade de vegetação e elevadas temperaturas médias.

Os gráficos apresentados na Figura 6.104 demonstram as taxas médias de evapotranspiração potencial por município (a) e por macrounidade ambiental (b). Vale ressaltar que, nesses gráficos, são apresentadas as taxas médias considerando-se e desconsiderando-se a área do lago.

O lago possui valores consideráveis de perda de água por evaporação, na média as perdas de água são entre 800 a 900mm por ano.

Os municípios de Sacramento e São Roque de Minas são os que apresentam as maiores taxas de evapotranspiração potencial, apresentando valores médios de 898 e 873mm/ano, respectivamente.

As macrounidades MB_m[06](5), MGU_m[31] podem ser destacadas por apresentar as maiores perdas potenciais de água por evapotranspiração, com valores de aproximadamente 930 e 902mm/ano, respectivamente.

Em Bom Jesus da Penha e Nova Resende e nas macrounidades MB_m[15](6), MB_m[14](6) detectaram-se as menores taxas potenciais de evapotranspiração; apresentam valores médios variando entre 718 e 720mm/ano.

Figura 6.104 - Gráficos de evapotranspiração potencial anual (mm) por município (a) e por macrounidade ambiental (b), considerando-se e desconsiderando-se a área do lago.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

A distribuição dos valores médios de evapotranspiração potencial por unidade ambiental pode ser notada nas Figuras 6.104 e 6.105.

Na Figura 6.104, é apresentado o gráfico de valores médios de evapotranspiração potencial anual por unidade ambiental. Nela constam os valores de quebras naturais, as quais discretizam, em grupos, as unidades com diferentes faixas de evapotranspiração potencial média; os níveis variam de muito baixa a muito alta.

O mapa da Figura 6.106 retrata a distribuição espacial de valores de evapotranspiração médios por unidade ambiental reclassificado em intervalos definidos de 50mm.

As unidades com as maiores demandas hídricas estão localizadas na porção norte da área de estudo, ao passo que os menores estão na porção sudoeste. As menores taxas médias de evapotranspiração potencial anual das unidades ambientais são entre 680 e 730mm por ano, já as maiores taxas variam entre 880 e 1010mm anuais.

Figura 6.105 - Gráfico de valores médios de evapotranspiração potencial anual por unidade ambiental

Figura 6.106 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto a demanda hídrica verde.

Podem-se destacar as unidades U[13]1(167), U[13]2(164) e U[15]1(36) como as que tem as menores taxas médias de evapotranspiração potencial anual (entre 573 e 610mm/ano) e U[06]4(02); U[09]1(01); U[26]4(04) que apresentam os maiores valores (entre 956 e 1007mm/ano).

A metodologia utilizada para estimar a demanda hídrica verde possibilitou a discretização dos níveis potenciais médios anuais de evapotranspiração, por unidade ambiental. Assim, ela revelou-se adequada para fins de estimativa desse componente do ciclo hidrológico, relacionado ao gerenciamento de bacias hidrográficas.

6.3.3.1.1 Análise dos padrões de demanda hídrica azul

Como se nota na Figura 6.107, dentre os 1551 pontos de uso de recursos hídricos cadastrados pelo zoneamento ambiental, a maior parte refere-se a demandas hídricas para fins agrossilvipastoris (1055 pontos e 583 empreendimentos) e industriais (161 pontos e 75 empreendimentos).

Figura 6.107 - Número de pontos de uso de recursos hídricos e empreendimentos cadastrados por tipo de atividade.

A Figura 6.108 demonstra o gráfico de percentual de pontos cadastrados por tipo de uso. A maioria dos pontos cadastrados é destinada ao consumo humano e a dessedentação de animais.

Figura 6.108 - Percentual de pontos cadastrados por tipo de uso.

As vazões de retirada e de consumo por tipo de uso consuntivo, considerados na estimativa de demanda hídrica azul, são apresentadas na Figura 6.109.

Figura 6.109 - Percentual de retirada (a) e consumo (b) de água por tipo de uso consuntivo.

Para a GD7, como um todo, estima-se uma vazão de retirada em torno de 3170m³/hora. Em torno de 77,6% (2462m³/hora) do montante captado é efetivamente consumido.

Dentre os usos consuntivos, as maiores parcelas de consumo de água são relacionadas à irrigação (49%), ao abastecimento público (27%) e ao consumo industrial (13%).

A bacia do Paraná é a região hidrográfica com maior taxa de consumo do país. Ela apresenta uma área de contribuição de 879873km² e envolve regiões com intensa atividade agropecuária e industrial. Em 2010 a referida região apresentou vazões de retirada de 736m³/s.

Relacionando-se a vazão com a área da bacia, pode-se obter a quantidade (em termos de milímetros) de água de chuva consumida na bacia. A região hidrográfica do Paraná apresentou um consumo de cerca de 26L/m².ano (ou mm/ano), em 2010.

Quando se relaciona as vazões totais de retirada e de consumo anual, verifica-se que a região do Médio Rio Grande, nessa avaliação, apresentou retirada e consumo em torno de 2,9 e 2,3 L/m².ano (ou mm/ano), respectivamente.

Os valores obtidos para a região estudada são baixos quando comparados à região hidrográfica a que pertence (Paraná). Esse resultado pode ser considerado pertinente, pois verifica-se que a GD7:

- apresenta uma extensa área preservada;
- apresenta, em geral, uma baixa densidade de pontos de captação, com apenas alguns hot spots de demanda, nas dependências de São Sebastião do Paraíso e Passos;
- não possui grandes polos industriais; e
- a Agência Nacional de Águas, ANA (2012) classifica os principais cursos d'água da área de estudo como com uma relação demanda/disponibilidade confortável a excelente e com qualidade boa a ótima.

As Figuras 6.110 e 6.111 apresentam os resultados de demanda hídrica azul anual por tipo de uso consuntivo nas macrounidades ambientais.

Os resultados de demanda hídrica por unidade ambiental são mostrados no gráfico da Figura 6.112. A carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de demanda hídrica azul consta na Figura 6.113. A técnica de fateamento da população de resultados adotada foi a de quebras naturais.

Nota-se que, de um modo geral, a porção sul da GD7 apresenta os maiores níveis de demanda hídrica azul.

Encontram-se “hot spots” de demanda nas proximidades das áreas urbanas de São Sebastião do Paraíso, Passos e Itaú de Minas. O município de São Sebastião do Paraíso envolve a maioria das unidades ambientais com níveis muito alto e alto de demanda hídrica azul.

A porção à direita da margem do lago apresenta os menores níveis de demanda, o que já era esperado pois nela predominam áreas com altos níveis de preservação ambiental.

As macrounidades MB_m[13](8), MB_b[19](6) e MB_m[14](6) apresentam os maiores níveis de demanda hídrica azul, com volumes consumidos anualmente de 11.598.079m³, 3.308.377m³, 2.835.350m³, respectivamente. Nas 2 primeiras, a maior parcela da demanda é para fins de irrigação; na terceira, a maior parcela é destinada ao abastecimento público.

As macrounidades MB_b[19](6), MB_m[14](6) e MB_m[13](8) apresentam as mais elevadas relações entre o consumo e área, apresentando valores 7,44L/m²; 6,19 L/m² e 4,80L/m², respectivamente.

A maioria das unidades com níveis altos a muito altos de demanda hídrica azul ocorrem na bacia MB_m[13](8) (rio São João), mais especificamente nas bacias afluentes de rio Santana. As unidades U[13]4(22), U[13]4(25), U[14]4(03) e U[13]4(04) têm os maiores níveis de demanda hídrica azul.

As macrounidades MB_m[04](6), MB_m[05](5), MGU_m[30] não apresentam usuários cadastrados. Dentre as 282 unidades ambientais, 82 não apresentam uso consuntivo cadastrado. A maior parte dos referidos compartimentos ambientais localiza-se nas áreas preservadas à direita da margem do lago.

Figura 6.110 - Uso consuntivo da água nas macrounidades ambientais (a) volume anual consumido por tipo de uso nas macrounidades (b) detalhe na faixa de valores entre 0 e 700000m³/ano.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Figura 6.111 - Uso consuntivo de água nas macrounidades ambientais percentual de consumo por tipo de uso.

* Os códigos das macrounidades encontram-se na Figura 6.3

Figura 6.112 - Demanda hídrica azul nas unidades ambientais.

Figura 6.113 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de demanda hídrica azul.

6.3.3.1.2 Análise dos padrões de demanda hídrica cinza

A carta de índice de potencial de poluição não pontual e as cartas de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de potenciais de demanda hídrica cinza difusa e pontual constam nas Figuras 6.114, 6.115 e 6.116, respectivamente.

A carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis pontuais de demanda hídrica cinza é apresentada na Figura 6.117.

De um modo geral, os padrões relacionados aos níveis de demanda hídrica cinza apresentam similaridade aos de demanda azul.

A porção sudeste da área é a que apresenta os maiores níveis de demanda hídrica azul. A porção à direita da margem do lago apresenta os menores níveis de demanda.

Em São Sebastião do Paraíso e Pratápolis, especialmente nas proximidades ao perímetro urbano desses municípios, ocorrem “hot spots” de demanda hídrica cinza.

A maioria das unidades com níveis altos a muito altos de demanda hídrica azul ocorrem na bacia MB_m[13](8) (rio São João). As unidades U[13]4(22), U[13]4(25), U[14]4(03) e U[13]4(04) apresentam os maiores níveis de demanda hídrica cinza.

Figura 6.114 - Carta de índice de potencial de poluição não pontual.

Figura 6.115 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de demanda hídrica cinza difusa.

Figura 6.116 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis potenciais de demanda hídrica cinza pontual.

Figura 6.117 - Carta de classificação das unidades ambientais quanto aos níveis de demanda hídrica cinza.

6.4 Análises finais – Potencialidades: Excedentes e deficiências hídricas

6.4.1 Potencialidades de excedentes hídricos

A avaliação de potencialidades de excedentes hídricos considera que, na região estudada, podem ocorrer excedentes hídricos associados à inundação de planícies (*riverine flooding*) e à enchente relâmpago (*flash flood*).

Esses episódios são originados de eventos chuvosos. A intensidade, a duração e a distribuição da chuva, as características físicas e a cobertura do terreno exercem influência sobre o potencial e a intensidade das cheias.

Dentre outras análises, a avaliação de índices pluviométricos (item 6.2.2.3.1) aponta tendências regionais e sazonais de distribuição e intensidade de eventos chuvosos máximos de 24 horas e dos trimestres chuvosos.

O balanço hidro-climatológico (item 6.2.2.4) e a análise de dados fluviométricos (item 6.2.3) indicam maior possibilidade de ocorrência de cheias nos meses de janeiro e fevereiro.

As análises morfométricas, geomorfométricas e de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial indicam as bacias com maior propensão à ocorrência de cheias.

Nesta etapa, procurou-se integrar informações potenciais relativas ao clima, ao escoamento superficial e à morfometria e geomorfometria das bacias hidrográficas, em dois produtos cartográficos que indicam potencialidades da área referentes à inundação de planícies e à enchente relâmpago.

6.4.1.1 Potencialidade de cheias relâmpago

O produto cartográfico que retrata as potencialidades das unidades ambientais à ocorrência de enchente relâmpago considerou:

- a carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica às cheias relâmpago;

- valores médios, obtidos por unidade ambiental (considerando toda a sua área de contribuição), de altura pluviométrica total anual, com duração de 24 horas e recorrência de 50 anos e
- a classificação das unidades ambientais quanto aos seus níveis de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial.

A partir dos documentos cartográficos citados acima, o potencial de cheias relâmpago foi ponderado a partir da seguinte operação:

$$\frac{2A + B + C}{4}$$

Onde, os indicadores e pesos dos atributos de cada indicador podem ser observados no Quadro 6.28.

Quadro 6.28 - Indicadores e pesos relativos de cada indicador e de seus atributos na avaliação do potencial de ocorrência de enchentes relâmpago.

Código	Indicador	Classe	Peso
A	Potencial morfométrico às cheias relâmpago	Muito baixo	1
		Baixo	2
		Médio	3
		Alto	4
		Muito alto	5
B	Potencial de escoamento superficial	Muito baixo	1
		Baixo	2
		Médio	3
		Alto	4
		Muito alto	5
C	Pluviosidade 24h 50 anos de recorrência	118 a 120mm	1
		120 a 130mm	2
		130 a 140mm	3
		140 a 150mm	4
		150 a 160mm	5
		160 a 170mm	6

A partir dos resultados, as unidades foram hierarquizadas em níveis relativos de potencial à ocorrência de cheias relâmpago.

Simultaneamente, elaborou-se um sistema de codificação que representa a classificação das unidades com relação a cada indicador considerado. Na Figura 6.118, consta

a chave de codificação das unidades ambientais com relação à sua potencialidade à ocorrência de enchentes relâmpago.

Figura 6.118 - Chave de codificação das unidades ambientais quanto à potencialidade à ocorrência de enchentes relâmpago.

O documento cartográfico que retrata as potencialidades das unidades ambientais ao desenvolvimento de enchentes relâmpago encontra-se no APÊNDICE J.

Os resultados da ponderação entre as potencialidades, relacionadas à pluviometria, ao escoamento superficial e à morfometria das bacias, ao desencadeamento de cheias relâmpago demonstram que as maiores potencialidades à ocorrência desses eventos ocorrem:

- na região à direita das margens do lago; essa região envolve a maior parte das unidades ambientais com potencialidades elevadas;

- nas macrounidades do córrego da Santa Bárbara (MB_m[09](5) do Ribeirão do Fumal MB_m[01](5) que envolvem somente unidades ambientais com potencialidades elevadas;
- nas unidades ambientais: U[31]4(01), U[03]4(04), U[13]4(07), U[13]5(15), U[05]5(01), U[04]5(02), U[03]5(01), U[01]5(01), U[01]5(02), U[11]4(01), U[17]4(03), U[05]4(03), U[08]4(03), U[09]4(02), U[09]4(03), U[13]4(04), U[03]4(07), U[13]6(09) e U[09]5(01).

6.4.1.1 Potencialidade de inundação de planícies

A carta que avalia os níveis potenciais à ocorrência de inundação de planícies nas unidades ambientais leva em conta:

- a carta de classificação das unidades ambientais quanto à potencialidade morfométrica à inundação de planícies;
- os valores médios, obtidos por unidade ambiental (considerando toda a sua área de contribuição), de altura pluviométrica total do trimestre chuvoso;
- a classificação das unidades ambientais quanto aos seus níveis de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial; e
- a carta de distância vertical da drenagem mais próxima (somente as classes de distância vertical da drenagem menor que 5 metros e de 5 a 15 metros).

Lançando-se mão dos documentos cartográficos citados acima, o potencial de inundação das planícies foi estimado através da seguinte operação:

$$\frac{2A + B + C}{4}$$

Onde: Os indicadores e pesos dos atributos de cada indicador são apresentados no Quadro 6.29.

Quadro 6.29 - Indicadores e pesos relativos de cada indicador e de seus atributos na avaliação do potencial de ocorrência de enchentes relâmpago.

Código	Indicador	Classe	Peso
A	Potencial morfométrico à inundação de planícies	Muito baixo	1
		Baixo	2
		Médio	3
		Alto	4
		Muito alto	5
B	Potencial de escoamento superficial	Muito alto	1
		Alto	2
		Médio	3
		Baixo	4
		Muito baixo	5
C	Pluviosidade do trimestre chuvoso	690 a 700 mm	1
		700 a 750 mm	2
		750 a 800 mm	3
		800 a 850 mm	4
		850 a 900 mm	5

A partir dos resultados, por unidade ambiental, as planícies de inundação (regiões com distância vertical das drenagens igual ou inferior a 15 metros) foram hierarquizadas em níveis relativos de potencial à inundação.

Ao mesmo tempo, preparou-se um sistema de codificação que demonstra a classificação das planícies com relação a cada indicador ponderado. A chave de codificação das potencialidades de inundação de planícies encontra-se na Figura 6.119.

O documento cartográfico que representa as potencialidades de inundações das planícies encontra-se no APÊNDICE K.

Os resultados da ponderação entre as potencialidades relacionadas à pluviometria, ao escoamento superficial e à morfometria das bacias, ao desencadeamento de inundações, demonstram que as maiores potencialidades à ocorrência desses episódios ocorrem nas unidades ambientais: U[03]5(01), U[10]4(01), U[13]4(25), U[13]6(04), U[13]7(05), U[13]7(06), U[13]7(07), U[13]8(01), U[25]8(4), U[27]8(04), U[28]8(04), U[29]8(01), U[30]8(02) e U[31]8(09).

Figura 6.119 - Chave de codificação da classificação das planícies quanto à potencialidade à ocorrência de inundação.

6.4.2 Potencialidades de disponibilidade hídrica

Os relatórios da Agência Nacional de Águas (ANA) enquadram os principais rios da GD7 em uma situação de disponibilidade hídrica confortável a ótima. Logo, a avaliação de potencialidades relacionadas à disponibilidade hídrica considera que a região estudada encontra-se em uma situação relativamente confortável em relação ao balanço disponibilidade/demanda.

Apesar do cenário positivo de disponibilidade hídrica, a análise pormenorizada desse aspecto, nas unidades que compõem a região da GD7, é indispensável, uma vez que:

- há um cenário crescente de demandas de uso consuntivo;
- há potencialidades de ocorrência de eventos climáticos extremos (secas prolongadas); e

- a demanda hídrica não é homogeneamente distribuída, há “hot spots” de demanda pelo uso dos recursos hídricos.

Para a análise de potencialidades de bacias hidrográficas, em relação à disponibilidade hídrica, devem-se levar em conta fatores relativos a:

- a distribuição espaço-temporal da chuva – esse deve ser considerado como o principal fator para a determinação da disponibilidade hídrica, pois define o “input” hídrico no sistema;
- o tempo que o volume de água precipitado prevalece na bacia – esse fator depende de potencialidades de escoamento superficial que variam, essencialmente, em função de características físicas (geomorfologia e composição de materiais terrestres) e da cobertura do terreno; e
- a demanda hídrica quali/quantitativa da água – nesse caso, assume-se que a evapotranspiração é responsável pela maior parcela da demanda; logo, presume-se que o balanço precipitação/evapotranspiração (input/output) determine a disponibilidade hídrica da bacia. Ao mesmo tempo, deve-se ponderar que, a cada dia, a captação de água e a emissão de cargas de poluição pontual e difusa nos rios contribuem e, em muitos casos, são determinantes sobre a degradação da disponibilidade dos recursos hídricos.

O item 6.2.2.3.1 apresenta uma extensa análise dos padrões pluviométricos da GD7.

Nele identificam-se:

- tendências regionais e sazonais de distribuição e magnitude de eventos chuvosos totais mensais e anuais;
- análise de séries temporais de pluviosidade que indica sazonalidades interanuais de períodos secos; e
- curvas de permanência de alturas pluviométricas totais anuais mínimas com diferentes probabilidades de ocorrência.

O balanço hidro climatológico (item 6.2.2.4) e a análise de dados fluviométricos (item 6.2.3) indicam, para a área de estudo, os meses de julho, agosto e setembro como os períodos do ano com maior chance de ocorrência déficit hídrico.

O tempo de retenção da água nas unidades ambientais é caracterizado, basicamente, a partir:

- da análise morfométrica de bacias (item 6.3.1), que classifica as unidades ambientais quanto às suas potencialidades morfométricas de regularização de vazões; e
- das análises de potencial ao escoamento superficial (item 6.3.2) que diferenciam potencialidades do meio físico e antrópico das unidades ambientais quanto ao escoamento superficial.

O item 6.3.3 identifica e caracteriza potencialidades de demanda hídrica das unidades ambientais da GD7, sob os enfoques de demanda quantitativa (evapotranspiração, consumo de usuários) e qualitativa (cargas de poluição pontual e difusa).

A avaliação final de potencialidades de disponibilidade hídrica deu-se por unidade ambiental. Consideraram-se os seguintes parâmetros:

- disponibilidade hídrica total anual – balanço entre a precipitação total anual e a demanda hídrica verde potencial anual;
- potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial;
- potencial morfométrico de regularização de vazão;
- uso consuntivo da água; e
- degradação qualitativa da água.

O potencial de disponibilidade hídrica das unidades ambientais foi ponderado a partir da média entre os indicadores citados acima. No Quadro 6.30 constam os indicadores e pesos atribuídos a cada um de seus atributos.

A partir dos resultados, as unidades foram hierarquizadas em níveis relativos de disponibilidade hídrica potencial. Adicionalmente, elaborou-se um sistema de codificação que retrata a classificação das unidades com relação a cada indicador considerado. Na Figura 6.120, consta a chave de codificação das unidades ambientais em relação à sua disponibilidade hídrica potencial.

Quadro 6.30 - Indicadores e pesos relativos de cada indicador e de seus atributos na avaliação da disponibilidade hídrica potencial das unidades ambientais.

Código	Indicador	Classe	Peso
A	Disponibilidade hídrica (P-ETP)	600 a 650 L/m ³ .ano	1
		650 a 700 L/m ³ .ano	2
		700 a 750 L/m ³ .ano	3
		750 a 800 L/m ³ .ano	4
		800 a 850 L/m ³ .ano	5
		850 a 900 L/m ³ .ano	6
		900 a 950 L/m ³ .ano	7
B	Potencial morfométrico regularização de vazões	Muito baixo	1
		Baixo	2
		Médio	3
		Alto	4
		Muito alto	5
C	Potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial	Muito alto	1
		Alto	2
		Médio	3
		Baixo	4
		Muito baixo	5
D	Uso consuntivo	69 L/m ³ .ano	1
		20 a 35 L/m ³ .ano	2
		10 a 20 L/m ³ .ano	3
		5 a 10 L/m ³ .ano	4
		0 a 5 L/m ³ .ano	5
		0 L/m ³ .ano	6
E	Demanda cinza	Muito alto	1
		Alto	2
		Médio a alto	3
		Baixo a médio	4
		Baixo	5
		Muito baixo	6

Figura 6.120 - Chave de codificação da classificação das unidades ambientais quanto a potencialidades relacionadas à disponibilidade hídrica.

A carta que retrata as potencialidades de disponibilidade hídrica da GD7 é apresentada no APÊNDICE L.

Os resultados da ponderação entre as potencialidades relacionadas ao balanço precipitação/evapotranspiração, ao escoamento superficial e à morfometria das bacias, as demandas quali-quantitativas de água mostram que:

- as unidades localizadas na porção sudeste da GD7 apresentam menor disponibilidade hídrica;
- os maiores níveis potenciais de disponibilidade hídrica encontram-se na porção oeste da área de estudo;
- as unidades U[13]6(08), U[13]5(14), U[13]6(02), U[13]7(04), U[16]5(02), U[16]6(01), U[13]6(01), U[13]7(01), U[13]7(07), U[13]4(13), U[13]4(31) e U[16]4(02) apresentaram os menores níveis de disponibilidade hídrica potencial; e
- as unidades U[20]4(01), U[18]4(02), U[19]4(04), U[18]4(04), U[10]4(02), U[31]4(01) apresentaram os maiores níveis de disponibilidade hídrica potencial.

7 Considerações finais

7.1 Uso de geotecnologias

Em função da extensão da área e da grande quantidade de informações a serem obtidas, armazenadas e tratadas, o uso de geotecnologias foi fundamental. Quanto ao uso dessas ferramentas conclui-se que:

- o GPS foi indispensável para fins de navegação, definição de pontos de controle e obtenção de dados pontuais em atividades de campo;
- os dados obtidos a partir de sensores remotos a bordo dos satélites ALOS, Landsat5 e SRTM e as informações disponíveis, através da rede (internet), no software *GoogleEarth*, foram imprescindíveis para a aquisição de informações das atividades de uso e ocupação (incluindo atividades pontuais modificadoras do meio físico), do relevo e do clima da região estudada;
- o processamento analógico dos dados, via sensoriamento remoto, os softwares *ArcGIS* e *AutoDeskMap* mostraram-se mais eficientes, ao passo que, para o processamento digital de imagens (PDI), foram utilizados os softwares *ArcGIS* e *ENVI*;
- no caso de procedimentos, como calibração radiométrica, cômputo de índices de refletância e de índices de vegetação, o software *ENVI* mostrou-se mais vantajoso, uma vez que já possui rotinas (com parâmetros e modelos matemáticos) implementadas, para produtos de alguns sensores orbitais, permitindo, assim, maior agilidade nas referidas manipulações. Já para processamentos envolvendo o uso de modelos matemáticos, considerando-se ainda vários condicionantes, o *ArcGIS* é mais prático;
- as rotinas do HAND implementadas na extensão de ferramentas hidrológicas do *TerraView* e que podem ser utilizadas no IDL do *ENVI* mostraram-se mais convenientes em relação ao pacote de ferramentas hidrológicas oferecido pelo *ArcGIS*. Esse fato foi constatado tanto para fins de correção e consistência do modelo digital de elevação quanto para a obtenção dos modelos de direção de

fluxo e fluxo acumulado e delimitação automatizada de bacias hidrográficas. Adicionalmente, no referido pacote de ferramentas, está implementado o algoritmo que permite a obtenção do modelo de distância vertical da drenagem mais próxima;

- o software *ArcGIS* foi de suma importância na aquisição, armazenamento, processamento e análise (espaço-temporal e estatística) dos parâmetros ambientais avaliados nesta pesquisa;
- a compatibilidade e a facilidade de conversão de extensões de dados (raster, vetor e tabular), obtidos e utilizados nos diferentes softwares, foram de essencial relevância para esta pesquisa, uma vez que cada um apresenta vantagens para os diferentes fins.

7.2 Análises realizadas e resultados obtidos

7.2.1 Compartimentação em macrounidades e unidades ambientais

A compartimentação da área de estudo em macrounidades (30) e unidades ambientais (289) mostrou-se adequada para fins da análise geoambiental voltada ao gerenciamento de recursos hídricos, uma vez que viabilizou análises considerando-se toda a bacia de contribuição.

7.2.2 Padrões de ocupação territorial

O mapeamento de uso e ocupação possibilitou a identificação de regiões com diferentes padrões de ocupação (natural e/ou antrópica) e, conseqüentemente, de fatores potenciais relativos à proteção e à degradação dos recursos hídricos da região estudada.

Verifica-se que, na maior parte das unidades, há predominância de atividades agropecuárias, (pecuária e culturas anuais). Há uma nítida divisão entre as regiões preservadas e agropecuárias; a maioria das unidades localizadas à esquerda da margem do lago são agropecuárias, ao passo que as preservadas estão à direita, na região da Serra da Canastra.

7.2.3 *Potencialidades hidro-climáticas*

A avaliação de parâmetros climatológicos permitiu a identificação dos seus padrões de variação espaço-temporais. De uma forma geral, as regiões com maior excedente hídrico localizam-se nas porções sudoeste e noroeste.

A partir da análise dos parâmetros climáticos, do BHC e de dados de monitoramento do escoamento superficial (vazão), ficam claramente definidos os seguintes padrões sazonais médios da região estudada:

- Úmido – entre dezembro e março.
- Seco – entre julho e setembro
- Transição - um úmido-seco que ocorre predominantemente entre abril e junho (período de retirada de água do solo), outro seco-úmido que ocorre predominantemente entre outubro e novembro (período de reposição de água no solo).

7.2.4 *Geomorfometria*

Observa-se que há significativa correspondência entre os índices morfométricos e geomorfométricos e padrões de infiltração e escoamento superficial. Assim, esses parâmetros foram relevantes na caracterização e na análise das potencialidades hidrológicas das bacias.

Os modelos geomorfométricos ICCD, ICR, ICGC e HAND mostraram-se capazes de efetuar uma eficiente e ágil demarcação de regiões hidrológica, ecológica e geomorfologicamente distintas.

7.2.5 *Potencial de escoamento superficial*

A avaliação do potencial de escoamento superficial com base em parâmetros geomorfométricos demonstrou-se eficiente, pois demarca unidades mais regionalizadas, que apresentam padrões geomorfométricos e, conseqüentemente, hidrológicos homogêneos, ao passo que a carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial apresenta maior escala de detalhamento.

A vantagem da nova técnica proposta é a facilidade e a agilidade de elaboração, em função dos dados de entrada necessários, bem como a possibilidade de validação cruzada e a verificação de outros modelos que consideram vários aspectos do meio físico.

A análise da carta de potencial ao escoamento superficial mostra que, na porção nordeste e adjacências e na bacia do rio São João, há as maiores concentrações de valores elevados de potenciais de escoamento superficial. As menores taxas ocorrem na porção oeste da GD7 (região bacia sedimentar do Paraná), em regiões de coberturas quaternárias, nas áreas marginais ao lago e em platôs situados na Serra de Fortaleza, na Serra do Chapadão e no extremo norte da região estudada.

7.2.6 *Demandas hídricas potenciais*

As demandas hídricas dos compartimentos ambientais que compõem a GD7 foram caracterizadas segundo potencialidades de consumo de água pela vegetação (demanda verde), uso consuntivo da água (demanda azul) e despejo de cargas poluidoras.

As perdas de água por evapotranspiração constituem a parcela mais significativa de demanda hídrica. Nas unidades ambientais, na média em relação ao total precipitado, 51% das perdas de água são por esse processo; esse valor varia entre 63% na unidade U[314(04) e 44% na unidade U[18]5(03). As menores taxas são observadas na porção sudeste e aumentam gradativamente em direção as porções norte e noroeste.

De maneira geral, a demanda azul é baixa quando comparada a valores encontrados na bacia do Paraná e em relação à disponibilidade hídrica (relação P-ETP) da área; contudo, os pontos de captação estão heterogeneamente distribuídos levando a alguns “hot spots” de demanda hídrica tanto em termos qualitativos quanto quantitativos.

Nas proximidades das áreas urbanas de São Sebastião do Paraíso, Passos e Itaú de Minas, encontram-se os maiores níveis de demanda azul e cinza. O município de São Sebastião do Paraíso abarca a maioria das unidades com elevados níveis de demanda quali e quantitativa (azul e cinza).

7.2.7 *Potencialidades de excedentes e deficiências hídricas*

Pela integração entre fatores relativos às potencialidades climáticas, morfométricas, físicas e antrópicas das bacias ao desenvolvimento de cheias relâmpago e inundações de planícies, verificou-se que:

- A porção à direita das margens do lago é a que apresenta as maiores potencialidades à ocorrência de cheias relâmpago, principalmente as regiões do córrego da Santa Bárbara e do Ribeirão do Fumal.
- Em relação à porção à esquerda das margens do lago, a bacia do Ribeirão São Pedro (incluindo as suas bacias de contribuição) e as unidades afluentes do Rio Santana (U[13]4(04), U[13]4(05), U[13]5(15)) apresentam elevados níveis potenciais. Essas bacias têm altos níveis de risco, localizam-se a montante e/ou atravessam as áreas urbanas dos municípios de Jacuí e Pratápolis.
- As maiores planícies de inundação localizam-se nas macrounidades às margens do lago, onde as cotas de inundação são regularizadas pelas barragens hidrelétricas. Com exceção das macrounidades que margeiam o lago, a bacia do rio São João (MB_m[13](8)) envolve a maior área de planícies de inundação (171km²).
- Nas áreas urbanas dos municípios de Alpinópolis, Monte Santo de Minas, Nova Resende e São Tomas de Aquino, não foram detectadas planícies de inundação.
- As maiores (média a alta) potencialidades de inundação de planícies que coincidem com áreas urbanas ocorrem nos municípios de Itamogi, Pratápolis, Itaú de Minas, Delfinópolis, Passos e Jacuí; sendo que Passos, Itaú de Minas e Pratápolis são os municípios que possuem as maiores áreas de abrangência de áreas passíveis de inundação, localizadas em zonas de centro urbano.

Pela integração entre o balanço de valores médios (obtidos por unidade ambiental, considerando-se toda a área de contribuição) de precipitação e evapotranspiração total anual, as potencialidades morfométricas, físicas e antrópicas de armazenamento de água (regularização) e potencialidades de demandas antrópicas, pode-se concluir que as unidades localizadas na porção sudeste da GD7 apresentam menor disponibilidade hídrica, enquanto os maiores níveis potenciais encontram-se nas porções norte e sudoeste.

7.3 Propostas para trabalhos futuros

7.3.1 *Visando à obtenção de técnicas mais automatizadas de mapeamento geomorfológico*

Os resultados obtidos permitem concluir que a integração do modelo de distância vertical da drenagem mais próxima (HAND) aos modelos de ICR, ICGC e ICCD pode levar a um método sistematizado ágil e extremamente eficaz, com parâmetros padronizados de mapeamento de unidades geomorfológicas.

Neste trabalho não foram realizados testes dessa natureza em função do tempo disponível e da tardia elaboração do modelo HAND.

7.3.2 *Visando ao gerenciamento dos recursos hídricos da região do Médio Rio Grande*

Na região do Médio Rio Grande, há carência de dados de monitoramentos hidroclimatológicos. Para uma avaliação pormenorizada de potencialidades e riscos hidroclimáticos, há demanda por uma melhor calibração, validação e atualização de documentos cartográficos e análises hidrológicas produzidos neste trabalho.

Assim, há a necessidade da implementação de uma rede de monitoramento de parâmetros ambientais, considerados fundamentais para fins da gestão dos recursos hídricos, tais como:

- dados de carácter climático, como:
 - o pluviosidade, incluindo dados de frequência diária e de frequência horária;
 - o temperatura;
 - o velocidade e direção dos ventos;
- dados de carácter hidrológico, como:
 - o fluviometria;
 - o sedimentometria;
 - o qualidade da água;

- dados de cobertura do terreno, como:
 - o expansão de áreas urbanas;
 - o alteração da cobertura vegetal; e
 - o dinâmica das atividades agrícolas.

O adensamento de estações com dados de monitoramento de pluviosidade, temperatura e velocidade e direção de ventos, principalmente na região da Serra da Canastra e na porção norte da área de estudo, pode viabilizar uma compreensão pormenorizada da dinâmica climatológica, incluindo a verificação da influência do relevo e a modelagem geoestatística (co-krigagem).

Uma alternativa para viabilizar o adensamento de pontos de monitoramento de parâmetros climatológicos e quali-quantitativos da água é através de parcerias com os setores de usuários de água e empreendimentos potencialmente poluidores dos recursos hídricos e a integração dos dados em uma única base de dados georreferenciados.

Propõe-se para o CBH-GD7, como medida futura de gerenciamento dos recursos hídricos, a implementação de um sistema integrado de monitoramento, incluindo os dados climáticos, os dados de monitoramento quali-quantitativo da água, o monitoramento contínuo do uso e cobertura do terreno e o melhoramento (padronização) e a atualização de dados cadastrais de usuários.

Referências^a

Allen, R. et al. **SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land** - Idaho Implementation - Advanced training and user's manual - Idaho, USA, 2002, 98p. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/Final%20Sebal%20Manual.pdf> Acesso em: 05 jan. 2013.

ALMEIDA, A.Q. **Influência do desmatamento na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Córrego do Galo, Domingos Martins - ES**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007, 92p. Disponível em: < http://www.ct.ufes.br/ppgea/files/dissertacao_andre.pdf > Acesso em: 13 dez. 2011.

ANDRADE, H.; FONSECA, L. D. **Levantamento Semidetalhado dos Solos e Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras das Sub-bacias Hidrográficas dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande**. Passos: FESP/UEMG/UFLA, Fevereiro, 2013. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

AMARAL, F. C. S. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. EMBRAPA/RADAN:Laboratório de Geoinformação. 2005. Escala 1:250.000

AMARAL, R.; RIBEIRO, R.R. Inundações e enchentes. In TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer e prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009, p.39-52.

AMORIM, H.B. **Estudo de atributos do meio físico como base para o zoneamento geoambiental da região de influência do reservatório da usina hidroelétrica de Caconde (SP), escala 1:50.000, com uso de geoprocessamento**. Dissertação (Mestre em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. 170p.

AMARAL, F. C. S. . **Mapeamento dos Solos do Estado de Minas Gerais**. 2005. (Cartas, mapas ou similares/Mapa).

AMARAL, F. C. S. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. EMBRAPA/RADAN:Laboratório de Geoinformação. 2005.

^a De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023:2003.

AMORIM, H.B. **Estudo de atributos do meio físico como base para o zoneamento geoambiental da região de influência do reservatório da usina hidroelétrica de Caconde (SP), escala 1:50.000**, com uso de geoprocessamento. Dissertação (Mestre em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. 170p.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012**. Ed. Especial - Brasília: ANA, 2012. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/impressa/arquivos/Conjuntura2012.pdf>> Acesso em: 04 mar. 2013.

Araújo, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/SP**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. 181p.

ASWATHANARAYANA, U. **Geoenvironment an Introduction**. Rotterdam, Holanda: A. A. Balkema, 1995. 270p.

AVILA, Léo F.; MELLO, Carlos R. de; VIOLA, Marcelo R.. Mapeamento da precipitação provável Mínima par o sul de Minas Gerais. **Rev. bras. eng. agríc. ambiente.** , Campina Grande, v.13, supl. Dezembro 2009. Disponível a partir do <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662009000700013&lng=en&nrm=iso>. acesso em 24 jan. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000700013>.

AZAMBUJA, C. **Disponibilidade Hídrica da Bacia do Rio Piracicaba – Utilização do Modelo MODSIMP-32**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000, 180p.

BAENA, Luiz GN et al. Regionalização de vazões com base de los Modelo digitais de Elevação Pará a Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Eng. Agríc.** , Jaboticabal, v.24, n. 3, dezembro de 2004. Disponível a partir do <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162004000300013&lng=en&nrm=iso>. acesso em 24 jul. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>

BALDOCCHI, D.; MEYERS, T.; On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**, 90: 1-25. 1998. Disponível em: <http://www.cnr.berkeley.edu/biometlab/pdf/ddb_TM_AFM_1998_90_1.pdf>

BARBOSA, Sylvio Elvis da Silva et al . Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro , v. 10, n. 1, mar. 2005 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522005000100008&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 15 dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522005000100008>.

BHATT, C.M.; RAO, G.S.; BHANUMURTHY,V. Space Based Disaster Management of 2008 Kosi Floods, North Bihar, India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing** V. 38, N. 1, 99-108, 2009, DOI: 10.1007/s12524-010-0015-9; Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12524-010-0015-9>>

BLASCHKE, T. ; Kux, H.J.H. . **Sensoriamento Remoto e SIG avançados** - nova versão atualizada. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos Ltda., 2007. v. 1. 303p

BLASCHKE, T. Crisis-oriented landscape ecology research: the need for a new research framework. . In **IALE European conference**, 2005. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/216266247_Crisis-oriented_landscape_ecology_research_the_need_for_a_new_research_framework?citationList=incoming> Acesso em: 11 fev. 2012

Blaschke, T.; J. Strobl. **What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS**. Zeitschrift für Geoinformation systeme, v. 6, p. 12-17, 2001.

Brasil - Lei Federal nº 6938 de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília 31 ago. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>

Brasil - Lei Federal nº 9433 de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**. Brasília 01 jan. 1997. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=327>> acesso em: 01 out. 2010.

Brasil - Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Estabelece diretrizes para Avaliação de Impacto Ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>> acesso em: 15 out. 2010.

BROLLO, M. J. **Metodologia automatizada para seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos. Aplicação na Região Metropolitana de Campinas (SP)**. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. 233p.

BRUBACHER, J.P.; OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A. Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfológicas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos / RS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 15, 2011, Curitiba-PR. **Anais Eletrônicos...** Curitiba-PR, 2011. p.1279-1286. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0366.pdf>> Acessado em: 11/12/2011.

BÜCHELE, B. et al. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.6, n.4, p.485-503, Jun 2006. Disponível em: <<http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/485/2006/nhess-6-485-2006.pdf>>

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 1ed. São José dos Campos: INPE, 1998.v.único.190p.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. (Org.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>> .Acesso em: 13 out. 2011

CANÇADO, C. J. **Zoneamento conceitual da expansão das atividades antrópicas relacionado à inundação – estudo de caso: Bacia do Rio Bonito (SP)**. 2003. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003. 388p.

CARVALHO, Rodolfo Moreira; ALMEIDA, Camila Natália Ramos de; COLLARES, Eduardo Goulart. **Levantamento do Uso dos Recursos Hídricos e Implantação de um Programa de Sensibilização Ambiental com Produtores Rurais das Sub-Bacias Hidrográficas do Médio Rio Grande**. Passos: FESP/UEMG, Fevereiro, 2012. 308p. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

CENDRERO, A. Desarrollo y tendencias de la Geología Ambiental en Europa. In: SEMINARIO Andino de Geología Ambiental, I.; CONFERENCIA Colombiana de Geología Ambiental, I., 30 abr.-2 mai. Medellín, 1990. **Memoria AGID/Report**, 13. Medellín, CO., 1990. p. 65-88.

CENDRERO, A. **Environmental geology of Santander Bay Area**. v. 1. Nova York: Engineering Geology, 1975. p. 97-114.

CETCAF – Centro de Desenvolvimento Tecnológico do Café - **Manual técnico de cafeicultura sustentável** – Disponível em: <<http://www.cetcaf.com.br/Apostila%20Curso%20Pratico%20rev%20NOV2008.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2013.

CHECCHI, G. Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index. **Ann Ist Super Sanità**: 2007, vol. 43, nº3, p.295-301. Disponível em: < <http://www.iss.it/publ/anna/2007/3/433295.pdf> > Acesso em: 18 fev. 2013.

CHORLEY, R.J.; MALM, D.E.G.; POGORZELSKI, H.A. A new standard for estimating basin shape. **American Journal of Science**, v. 255, 1957, p. 138-141.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas, **Notícia Geomofológica**, 11 (22), 1971, p. 9-19.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**: o canal fluvial. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981, 313p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher / EDUSP, 1980, 150p.

Clark, R. N., Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in **Manual of Remote Sensing**, V. 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58, 1999.

COLLARES, Eduardo Goulart. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas**: aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari - SP. 2000. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-25012001-115727/>>. Acesso em: 11 mai. 2011.

CONEJO, J.G.L.C. (cd.g) e BOLIVAR, A. M. (cd.exc.) **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2007. 123p. (Caderno de Recursos Hídricos, 2). Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf> > Acesso em: 13 mar. 2013.

CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climatológicos / INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2013. **Online**. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 10 jan. 2013.

CURRAN, P. J., Remote Sensing Methodologies and Geography, In. **Journal of Remote Sensing**; 1987, p.1255-1275,

DIEGUES, Antonio Carlos Sant'ana . **O Mito Moderno da Natureza Intocada**. 3. ed. São Paulo: HUCITEC e NUPAUB, 2001. v. 1. 161p .

Eastman, J. R. IDRISI Kilimanjaro **Guide to GIS and Image Processing**. Clark University: Worcester, MAG, USA, 2003. Manual version 14. 306p. Disponível em: <http://www.gis.unbc.ca/help/software/idrisi/kilimanjaro_manual.pdf> Acesso em: 12 ago. 2011.

MORELLI, E. B. **Reúso de Água no setor de transporte coletivo e postos de gasolina**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www.tratamentodeagua.com.br/r10/Lib/Image/art_1120048943_reuso_de_agua_d_e_lavagem_de_veiculos.pdf> Acesso em: 13 mar. 2013.

EHLERS, M. Sensoriamento remoto para usuários de SIG - Sistemas sensores e métodos: entre as exigências do usuário e a realidade. In: **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. Ed. BLASCHAKE, T.; KUX, H. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p.19-38.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. **Metodologia para Regionalização de Vazões**. Rio de Janeiro, 1985^a

PALHARES, J. C. P. **Estimando o consumo de água de suínos, aves e bovinos em uma propriedade**. EMBRAPA. 2005. 2p. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/upload/EMBRAPApUBLICACAO.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2013.

TABOSA, É. O. ; NASCIMENTO, F. L. ; RUBIO, J. . **Tratamento e reúso das águas de lavagem de veículos**. In: XIX Prêmio Jovem Cientista CNPq, 2003, Brasília. XIX Prêmio Jovem Cientista CNPq, 2003.

ESRI. ArcGIS Help Library 10.2.2013. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/>> Acesso em: 12 mar. 2013

GAMA ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS LTDA. **Estudo de metodologia e avaliação dos impactos da cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio das Velhas – UPGRH SF5**. 2009. Relatório Final. Belo Horizonte. 108p. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/cobranca/novomenu/cobranca/metodologia/relatorio-final-estudo-de-metodologia-velhas.pdf>> Acesso em: 20 mar. 2013.

FBB; MMA;FUNABRE. **Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil** – Relatório final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industrial e Agricultura Irrigada – Relatório Técnico 8, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao21032012055532.pdf> Acesso em: 15 mar. 2013.

FERREIRA, M.C. Modelagem cartográfica aplicada a mapeamentos de susceptibilidade a danos ambientais: um ensaio no SIG IDRISI. São Paulo. **Geociências**.v.15, n.2, 1996, p. 485-502.

FILHO, O.A. Sistemas de Infoções Geográficas Aplicadas à Engenharia Ambiental In: CALIJURI, M.C.; CUNHA,D.G.F. **Engenharia Ambiental - Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. Capítulo 25. p. 643-668.

FISCH, G. Caracterização climática e balanço hídrico de Taubaté (SP). **Revista Biociências**, v. 1, n. 1, p. 81–90, 1995.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo, 2008

FLORENZANO, Teresa Gallotti . Geotecnologias na Geografia Aplicada: Difusão e Acesso. **Revista do Departamento de Geografia** (USP), São Paulo, v. 17, p. 24-29, 2005. Disponível em: <http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG_17/Teresa_Gallotti_Florenzano.pdf> Acesso em: 25 nov. 2012.

FLORENZANO, Teresa Gallotti . **Imagens de satélite para estudos ambientais**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. v. 1. 104p .

FONTES, Silvana Brandão. **Estudo geoambiental da bacia do Rio Pardo, a partir da compartimentação em Ottobacias** - Escala 1: 100.000. 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-10062010-103021/>>. Acesso em: 12 set. 2012.

FRANÇA, G.V. de. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba**. Piracicaba, 1968. 151p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1968.

FURNAS. Furnas Centrais Elétricas. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemapfurnas/pqgeracao.asp>> Acesso em: 05 mar. 2013.

GANDOLFI, P. A. **Investigações sedimentológicas, morfométricas e físico-químicas nas bacias do MojiGuaçu, do Ribeira e do Peixe**. 1971. 150p. Tese (Geologia e Mecânica dos Solos) – Universidade de São Paulo SP, São Carlos, SP. 1971.

GENOVEZ, A. M. ; ZUFFO, A. C. . Chuvas Intensas no estado de São Paulo : Estudos existentes e análise comparativa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, PORTO ALEGRE, v. 5, n.3, p. 45-57, 2000. Disponível em:
<http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/fd0332e8899b003d949a92e1787805af_518d87209e4a9b19f1e80890ea2aa564.pdf> Acesso em: 15 jun. 2012.

GOMES, Daniela Marchete; COLLARES, Eduardo Goulart. **Compartimentação Territorial das Sub-Bacias Hidrográficas dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande em Macrounidades Ambientais e Unidades Territoriais Básicas**- UTB'S. Passos: FESP/UEMG, Dezembro, 2010. 38p. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

GOMES, Daniela Marchete; COLLARES, Eduardo Goulart. **Levantamento Geológico das Sub-Bacias Hidrográficas dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande**. Passos: FESP/UEMG, 2010. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

GPRH - Grupo de Recursos Hidricos/ UFV. Sousa, H.T. de ; PRUSKI, F. F. ; BOF, L. H. N. ; CECON, P. R. ; Sousa, J.R.C. de . **SisCAH Sistema Computacional para Análises Hidrológicas**. 2009. Disponível em: <<http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>>

GRECCHI, R.C. **Zoneamento geoambiental da região de piracicaba-SP, com auxílio de geoprocessamento**. Dissertação (Mestre em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. 132p.

HAUPT, Jaqueline Patricia de Oliveira. **Metodologia para avaliação do potencial de produção de poluição difusa: estudo de caso da bacia do Rio Jundiáí**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-20072009-173457/>>. Acesso em: 20 mar. 2012.

HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: Teixeira, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001. p.421-444.

HOBSON, R. D. **Surface roughness in topography: quantitative approach** In: Chorley, R.J., 1972. Spatial analysis in geomorphology, 225-245, 1972.

HOEKSTRA, A. Y. et al. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. London. Washington, DC: 2011.

Hoekstra, A.Y. (ed.) '**Virtual water trade**: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002' Value of Water Research Report Series Nº12, IHE Delft. Disponível em:<<http://www.utwente.nl/ctw/wem/organisatie/medewerkers/hoekstra/reports/report12.pdf>> Acesso em: 13 fev. 2013.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society America Bulletin**, 56(3), 1945, p. 275-370.

Hutchinson, M. F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, 106: 211–232.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de climas do Brasil**. 2002. Escala 1:5.000.000. IBGE, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm> Acesso em: 05 mar. 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/index.php>> Acesso em: 05 mar. 2013.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas – **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2010. 113p. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/outorga/manual/manual-de-outorga.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2013.

INE - Instituto Nacional de Estatística (Portugal). **Uso da água na agricultura**. Portugal, Lisboa, 2011. Edição 2011. ISBN 978-989-25-0145-1

INFANTI JR.,N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial In: OLIVEIRA, A.M.S e BRITO, S.N.A. (eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p.101-109.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística . **Manual Técnico de Uso da Terra - 2ª Edição**, 2006. Disponível em:<ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/manuais_tecnicos/manual_uso_da_terra.pdf> Acesso em: 13 fev. 2012.

SOLFORO et al. Inventário Florestal - monitoramento contínuo. 2013. **Online**. Disponível em: <<http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/inventarioFlorestal/>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

IUGS What are Geoindicators?, 2012. **Online**. Disponível em:
<<http://www.lgt.lt/geoind/doc.php?did=geoindicators>> Acesso em: 13/09/2012

Jensen, J. R., 2005, **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**, 3ª Edição, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 525 p.

Jensen, John R., 1949 - **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva e recursos terrestres** / John. R. Jensen; Tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coord.) ... Et al. - São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009 598p.

Karmann, I. Ciclo da água, Água subterrânea e sua ação geológica. In: Teixeira, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001, p.113-138.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Ed.). **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: 1936. v. 1, p. 1-44, part C.

KUX, H., PEREIRA, M. N., FLORENZANO, T. G., SOUZA, I. M. E., GONÇALVES, C.D.A.B., PINHO, C. M., ARAUJO, E. H. G. Sensoriamento remoto e SIG com sistemas imageadores de alta resolução – desafios e perspectivas destas tecnologias para o planejamento e gerenciamento urbano no Brasil. In: International Congress on Environmental Planning and Management – Environmental Challenges of Urbanization, 1 **CD-ROM**, September, 11th - 15th, 2005, Brasília.

LANG, S., BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem**. (H. Kux, Trad.) São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

LANNA, A. E. L. . Gestão de Recursos Hídricos. In: Carlos Eduardo Morelli Tucci. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 1ed.Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, EDUSP, ABRH, 1993, v. 1, p. 727-768.

LEIVAS, J.; FONTANA, D.; BERLATO, M.; CARDOSO, L.. Variação diária do albedo sobre uma superfície vegetada e sobre um lago na estação experimental da UFRGS/RS. XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju – SE . **Online**. Disponível em:<<http://www.ufrgs.br/leaa/arquivos/Artigos%20em%20Eventos%20Cient%C3%ADficos/Leivas%20Fontana%20Berlato%20Cardoso%20CBA%202007.pdf>> Acesso em: 05 jan. 2013.

LIMA, L.M.M. **Mapeamento da Suscetibilidade à Inundação na Bacia Hidrográfica do Arroio do Salso, Porto Alegre** - RS. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Geociências, Porto Alegre-RS, 2010. 174p. Disponível em:
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25554/000754214.pdf?sequence=1>>
Acessado em: 15 abr. 2011.

LIU, T.H. W. **Aplicações de sensoriamento remoto**, Campo Grande: Editora UNIDERP – 2006 – 908p. ISBN: 8577040402.

MACEDO, R.F. **Proposta Metodológica para a Análise de Cenários de Disponibilidade Hídrica e Demanda Hídrica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005, 181p.

MAGALHÃES, S.F.C. et. al. Uso de geoprocessamento na estimativa da vazão da micro-bacia do Córrego Atalaia em Macaé, RJ. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3, 2010, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife. Disponível em: <http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/CartografiaeSIG/SIG/A_38.pdf> Acesso em: 14/01/2012.

MAGRI, R. A. F. ; COLLARES, E. G. **A Elaboração de uma Carta de Potencial ao Escoamento Superficial para fins do Zoneamento Ambiental das Sub-Bacias Hidrográficas do Médio Rio Grande**. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011, São Paulo. Anais... CBGESão Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011.CD-ROM

MAGRI, Rômulo Amaral Faustino. **Análise da suscetibilidade à erosão da região do Médio Rio Grande (MG)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MARCUZZO, F. F. N. ; Andrade, L. R. ; Melo, D. C. R. . Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, p. 793-804, 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/art_marcuzzo_metodos.pdf> Acesso em: 02 Dez. 2012.

MARQUES, F.G.; DANIEL, L.A. Disponibilidade hídrica e aptidão agrícola das terras da região do semi-árido brasileiro como subsídios para a gestão dos recursos hídricos. In. Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 2000, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...**Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/v-044.pdf>> Acesso em: 10 jan. 2012.

Minas Gerais, IGAM. **Portaria do Instituto Mineiro de Gestão das Águas nº30**, de 15 de junho de 1993 que altera a redação da Portaria nº97/1990 que regulamenta o processo de outorga de uso de águas públicas estaduais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=3776>> Acesso em: 14 mar. 2011.

Minas Gerais - **Lei Estadual nº 13199** de 29 de janeiro de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5309>> Acesso em: 14 mar. 2011.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 27 jan. 2012.

MOEL, H.; ALPHEN, J.; AERTS, J.C.J.H. Flood maps in Europe - methods, availability and use. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, mar/2009, 289-301. Disponível em: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/289/2009/nhess-9-289-2009.pdf>> Acesso em 13 abr. 2011.

MOREIRA, Michel Castro ; PRUSKI, Fernando Falco ; SILVA, André Luiz da ; SILVA, Demetrius David ; SILVA, José Márcio Alves da . SINGERH: sistema integrado para a gestão de recursos hídricos. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007, São Paulo, SP. Gestão de recursos hídricos, integração de políticas e sustentabilidade do meio ambiente urbano, 2007.

MORISAWA, M.E. Quantitative Geomorphology of Some Watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, 73, 1962, p.1025-1046.

MOURA, C.M. **Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano**. Belo Horizonte: Ed. da autora, 2003. 249p.

MÜLLER, V. C. **A geomorfologia quantitativa estudo das características da bacia de drenagem na área de montanha Clinch** . New York: Virginia e Tennessee. Departamento de Geologia. n. 3, p. 30, 1953.

MUNAFÒ, M.; CECCHI, G.; BAIOTTO, F.; MANCINI, L. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment. **Jornal of Environmental Management**, v. 77, n. 2, p.93-98, 2005.

NOVAES, L.F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005, 104p. Disponível em: <<ftp://ftp.bbt.ufv.br/teses/engenharia%20agricola/2005/186614f.pdf>> Acesso em: 13 nov. 2011.

OLIVEIRA, F.A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: Estudo de caso da bacia do Rio Grande**. 2008. Dissertação (Mestrado em Magister Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008, 173p. Disponível em:

<http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/13/TDE-2008-08-26T081653Z-1294/Publico/01%20-%20capa_pag%2093.pdf> Acesso em: 15 nov. 2011.

OLIVEIRA, G. G. O.; GUASSELLI, L. A.; SALDANHA, D. L. Influência de variáveis morfométricas e da distribuição das chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí, RS. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VII SINAGEO, n.3, Set. 2010. p. 126-140. Disponível em:

<<http://www.ufpe.br/revistageografia/index.php/revista/article/viewFile/390/268>> Acessado em: 20 jun. 2011.

PATTON, P. C.; BAKER, V. R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water Resources Research**, 12 (1976), pp. 941–952

PATTON, P.C. Drainage Basin Morphometry and Floods. In: BAKER, V. R. et al. (eds.). **Flood Geomorphology**. John Wiley & Sons. 1988, p. 51-64.

Patton, P.C.; Baker, V.R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water Resources Research**, 12 (5), 1976, p.941-952. DOI: 10.1029/WR012i005p00941

Patton, P.C.; Baker, V.R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water Resources Research**, 12(5), 1976, p.941-952.

PIRES, J.S.R; SANTOS, J.E.; DELPRETTI, M.E. Parâmetros físicos para o gerenciamento de bacias hidrográficas. In SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A.F.M. **Conceitos de bacias hidrográficas: teoria e aplicações**. Ilheus, BA: Editus, 2002. p. 17-36.

PRANDINI, F. L. A cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. In: **5º Apostila do curso de geologia aplicada ao meio ambiente**, p. 233 a 251.

RENNÓ, C. D. ; NOBRE, A. D. ; CUARTAS, L. A. ; SOARES, J. V. ; HODNETT, M. G. ; TOMASELLA, J. ; WATERLOO, M. J. . HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481, 2008.

RICCOMINI, C.; GIANNINI, P.C.F.; MANCINI, F. Rios e processos aluviais. p.191-214 In: Teixeira, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001. p.191-214.

ROBAINA, L. E. S. ; TRENTIN, Romário ; NARDIN, Dionara de ; CRISTO, Sandro Sidnei Vargas de . Métodos e Técnicas Geográficas utilizadas na Análise e Zoneamento Ambiental.

Geografias (UFMG), v. 05, p. 36-49, 2009.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora, MG: E. do Autor, 2000, 220p.

RODRIGUES, D. B. B. ; Mendiando, E. M. . Bacias hidrográficas: caracterização e manejo sustentável. In: Calijuri, M.C.; Cunha, D.G.F.. (Org.). **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologias e Gestão**. 1ed.São Paulo: Campus-Elsevier, 2012, v. 1, p. 1-30.

RODRIGUES, G. O. ; Nobre A D ; Silveira A C ; Cuartas L. A. . Efeito da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) - estudo de caso em Manaus/AM. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba/PR. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2011. Disponível em:<<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1379.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2013.

RODRIGUEZ, R.D.G. **Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: Estudo de caso da bacia do Paracatu**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004, 93p. Disponível em: <<ftp://ftp.bbt.ufv.br/teses/engenharia%20agricola/2004/181216f.pdf>> Acesso em: 10/01/2012.

ROSA, R. . Geotecnologias na Geografia Aplicada. **Revista do Departamento de Geografia** (USP), São Paulo, v. 16, p. 81-90, 2005. Disponível em:<http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG_16/Roberto_Rosa.pdf>

ROSA, R. e BRITO, J.L.S. **Introdução ao Geoprocessamento: Sistema de Informações Geográficas**. Uberlândia, EDUFU, 1996, 104p.

SAMPAIO, T. V. M. Índice de Concentração da Rugosidade (ICR): uma proposta para o mapeamento morfométrico via emprego de geotecnologias. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, SBGFA. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Viçosa, MG, 2009.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SASSO, Roberlei César Dal; COLLARES, Eduardo Goulart. **Diagnóstico da situação do Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário como subsídio ao Zoneamento Ambiental das Sub-Bacias Hidrográficas dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande**. Passos: FESP/UEMG, 2010. 190p. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy, **Geol. Soc. America Bulletin**, 67, 1956, p. 597-646.

SILVA, M. M. ; FERREIRA, V. de O. ; BRITO, J. L. S. . RECONHECIMENTO DE POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NO REGIME PLUVIOMÉTRICO DA BACIA DO RIO ARAGUARI, MINAS GERAIS. **Revista Geo Norte**, v. 1, p. 754-765, 2012. Disponível em: <[http://www.revistageonorte.ufam.edu.br/attachments/013_\(Reconhecimento%20de%20poss%C3%ADveis%20influ%C3%Aancias%20dos%20eventos%20El%20Ni%C3%B1o%20e%20La%20Ni%C3%B1a%20no%20regime%20pluviom%C3%A9trico%20da%20bacia%20do%20Rio%20\).pdf](http://www.revistageonorte.ufam.edu.br/attachments/013_(Reconhecimento%20de%20poss%C3%ADveis%20influ%C3%Aancias%20dos%20eventos%20El%20Ni%C3%B1o%20e%20La%20Ni%C3%B1a%20no%20regime%20pluviom%C3%A9trico%20da%20bacia%20do%20Rio%20).pdf)> Acesso em 13 mar. 2013.

SILVA, Sandra Fernandes. **Zoneamento geoambiental com auxílio de lógica fuzzy e proposta de um geoindicador para caracterização do meio físico da Bacia do Rio do Peixe**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-16032006-164854/>>. Acesso em: 22 jul. 2011

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS: ABRH, 2001, p.35-51.

Silverman, B. W. **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. New York: Chapman and Hall, 1986. Disponível em:<http://www.foxgo.net/uploads/2/1/3/8/2138775/foxgodensityestimation_for_statistics_and_data.pdf>

SOARES, Wanessa Cartaxo. **Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG: análise espacial da profundidade do lençol freático e do 'N IND.SPT' para obras de fundação em João Pessoa** - PB. 2011. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-15052012-110127/>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

SOBREIRA, F. G. **Estudo Geoambiental do Conselho de Sesimbra**. 1995. Tese (Doutorado em Geologia) - Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1995. 347p.

SOUZA, C.R.G. Carta de suscetibilidade morfométrica de bacia de drenagem ao desenvolvimento de inundações Litoral Norte de São Paulo. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2006, Goiânia (GO). **Anais,... CD-ROM** (trabalho completo), 2006. 12p. Disponível em: < <http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/060.pdf> > Acessado em: 13 mai. 2011.

SOUZA, C.R.G. Suscetibilidade Morfométrica de Bacias de Drenagem ao Desenvolvimento de Inundações em Áreas Costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, UGB, v. 6, n. ANO- 6, p. 54-61, 2005. Disponível em: <http://www.ugb.org.br/home/artigos/SEPARATAS_RBG_Ano_6_n_1_2005/RBG_Ano_6_n_1_45_62.pdf>. Acessado em: 13 abr. 2011.

SOUZA, S.M.T. **Deflúvios Superficiais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Hidrossistemas – Engenharia de Recursos Hídricos. LTDA.: Copasa – Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais, 1993. 264p.

SOUZA, S.M.T. **Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: HIDROSSISTEMAS, 1995. 525p.

"STRAHLER, A.N. 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Network. In: CHOW, V.T. (ed.). **Handbook of Applied Hydrology**. McGraw-Hill. p. 40-74.

STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society America Bulletin**, 63, 1952, p.1119-1142.

TAVARES, A. C.; QUEIROZ, A. N. Análise geomorfológica da bacia do Ribeirão Claro. **Boletim de Geografia Teórica**, v. 11, n.21-22, p.47-64, 1981.

TAVARES, A. C.; SILVA, A.C.F. Urbanização, chuvas de verão e inundações: uma análise episódica. **Climatologia e estudos da paisagem**. Rio Claro. v. 3, n.1, 2008, p.4-18.

TELLES, D. A. Água na Agricultura e Pecuária. In. **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2.ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. p. 305-336.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2. ed.Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS: ABRH, 2001

TUNDISI, J. G; HCHIEL,D. La Cuenca hidrográfica como laboratorio experimental para La Enseñanza de ciência, Geografia y Educacion Ambiental In: **El Estudio de cuencas hidrográficas**. São Carlos: RIMA, 2002, p. 12-37. Disponível em: <<http://www.cdcc.usp.br/bio/pagIni.pdf>> acesso em: 15/10/2010.

UEHARA,K.; JORGE,N.F. Águas de Superfície In: OLIVEIRA, A.M.S e BRITO, S.N.A. (eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p.101-109.

Varnes DJ (1974) The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes. **Geological Survey Professional Papers**, 837. USGS, Washington, 48 pp

VILLELA, S. M. ; MATTOS, A. . **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, 1975. v. 1. 200 p

"Volkmer, S. et. al. Geomorfologia da quadrícula de Ponta Grossa, PR - uma ênfase aos recursos geotecnológicos utilizados. In: **Boletim de Geografia**, 2010, v. 28, n. 2. DOI:10.4025/BOLGEOGR.V28I2.10614. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/10614/6454>> Acesso em: 05 abril 2012

"WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration bay satellite remote sensing** – A casa study in Hupselse Beek, The Netherlands. Dissertation (Master of Science), International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Wageningen, Netherlands, 2005, 114p.

Whitehead, P.G. and Robinson, M. **Experimental basin studies: an international and historical perspective of forest impacts**, Amsterdam, J. Hydrology, v.45, p.217-230, 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002216949390055E>> Acesso em: 12 fev. 2012.

ZĂVOIANU, I. 1985. **Morphometry of Drainage Basins.Developments in Water Science**, v. 20. 2nd. Edition. Elsevier. 250p.

ZUQUETE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987, 3v.