



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO COM APLICAÇÃO DE
SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Área de Concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental

**TESE DE DOUTORADO
Nº 16**

Mauro Santos de Melo
Doutorando

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig
Orientador

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos
Co-orientador

**Brasília
2013**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO COM APLICAÇÃO DE
SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

MAURO SANTOS DE MELO

PLANO DE TESE SUBMETIDA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS PRÉ-REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM GEOCIÊNCIAS
APLICADAS

APROVADA POR:

HENRIQUE LLACER ROIG, Doutor, Professor Adjunto.
(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(ORIENTADOR)

ARDEMÍRIO BARROS DA SILVA, Doutor.
(Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS)
(EXAMINADOR EXTERNO)

FRANCISCO DE ASSIS DOURADO DA SILVA, Doutor.
(Universidade do Estado do rio de Janeiro - UERJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)

NORIS COSTA DINIZ, Doutora.
(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(EXAMINADORA INTERNA)

AUGUSTO CÉSAR BITTENCOURT PIRES, PhD.
(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, 13 de dezembro de 2013.

“Não se *gerencia* o que não se *mede*,
não se *mede* o que não se *define*,
não se *define* o que não se *entende*,
e não há *sucesso* no que não se *gerencia*”

(William Edwards Deming)

"Combati o bom combate, completei a minha carreira, guardei a fé"

(2 Timóteo, 4,7)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, a minha família e a Deus que me deram a chance para continuar vivendo e aprendendo.

Agradeço também ao meu orientador Henrique Llacer Roig e co-orientador José Elói Guimarães Campos pelo respeito às minhas ideias, colocações recebidas, discussões e apoio nas decisões mais difíceis.

A Agência Nacional de Águas pelo fornecimento de informações relevantes do sistema de recursos hídricos nacional.

Ao Subprocurador Geral da República Antônio Fonseca pelo apoio profissional para a finalização da tese.

A amiga Geografa Ana Maria Lebre Soares pelas considerações sobre as pesquisas e apoio incondicional.

Aos colegas de trabalho no setor de energia elétrica Alex Gois Orlandi, Carlos Alcebíades Barros Cavalcanti, Felipe Maruf Dib, Leonardo Freitas e Sidney Simões pelo companheirismo e trocas de conhecimentos e informações, e, todos os colegas da Aneel que contribuíram para elevar o conhecimento relacionado ao tema.

Aos companheiros do Instituto de Geociências e do laboratório de geociências, em especial ao Paulo Henrique Menezes, Júlia Curto e Gabriel Mouzinho, pelo auxílio em etapas do trabalho.

Ao filho Marcel.

As irmãs e irmãos Marne, Liana, Marcelo e Rodrigo.

A Maria Lucia Soares pela atenção nas horas necessárias.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente possibilitaram e apoiaram a realização desse trabalho.

RESUMO

Esse trabalho apresenta ferramentas e técnicas de elevado desempenho para avaliação de potenciais hidroelétricos em bacias hidrográficas. O tema sobre avaliação de potencial hidroelétrico tem sido estudado há décadas, porém, a ampliação da oferta de dados espaciais, aumento da acurácia e o uso de geotecnologias para tratamento de dados e informações possibilitam novas abordagens de estudos. Foram estudadas formas de avaliação integrada da fisiografia da bacia hidrográfica, meio ambiente e recursos hídricos, e, meio antrópico. A proposição consiste na aplicação de geotecnologias para aperfeiçoar consultas e análises tanto do potencial estimado (remanescente e individualizado) como do inventariado, baseando na estruturação da informação espacial para aplicação de ferramentas automatizadas em processos. O levantamento das pesquisas mundiais mais atuais para avaliação de potenciais hidroelétricos indica uma visão de estudo espacial da bacia hidrográfica mais sistêmica do que análises de potencial ao longo de trechos de cursos d'água, aplicadas atualmente ao levantamento do potencial estimado brasileiro. Diferentemente da grande maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, 75% da energia elétrica brasileira tem fonte de geração hidroenergética. Estima-se que apenas 32% do potencial hidroelétrico brasileiro se encontra explorado, restando cerca de 88,2 GW de potencial a explorar. Porém, grande parte desse potencial encontra-se em áreas protegidas, conhecidas como unidades de conservação. Em áreas mais urbanizadas, a construção de um reservatório pode exercer fortes influências sobre bens e serviços da sociedade. As metodologias para essas estimativas podem apresentar limitações por insuficiências de informações ou ferramentas e técnicas aplicadas. O maior conhecimento dos limites aceitáveis entre os sítios com potenciais de hidroenergia, os impactos socioeconômicos e a proteção da biodiversidade podem ser aprofundados com o desenvolvimento de ferramentas e técnicas para consultas mais transparentes e análises mais detalhadas desde as fases iniciais dos estudos. A metodologia desenvolvida consiste na análise do modelo digital de elevação para identificação de quedas d'água, na regionalização de dados hidrológicos e na análise integrada com informações do meio ambiente, infraestrutura existente e fatores econômicos. Foram aplicados métodos de abstração, conversão e estruturação de dados baseados em estatística espacial, álgebra de mapas, análises multivariadas de dados e sistema de apoio à decisão por análise multicritério. As ferramentas e técnicas utilizadas na área de estudo, podem ser aplicadas a outras regiões do território brasileiro. A base de dados geográficos da fisiografia, da hidrologia, do meio ambiente e da infraestrutura, utilizada nesse trabalho, tem propriedades discretas e contínuas e pode ser aplicada a estudos com abrangência regional ou nacional. O resultado final são propostas de estruturação da informação associadas aos processos em sistemas de informação geográfica para aperfeiçoamento das avaliações integradas de potenciais hidroelétricos.

ABSTRACT

This research seeks to introduce high-performance tools and techniques to the evaluation of hydroelectric potential in watersheds. The evaluation of hydroelectric potential has been studied for decades, however, the expansion of the spatial data, accuracy increasing and the use of Geotechnologies for data and information processing enable new approaches. An evaluation approach purposed the integration of the watershed physiographic feature, the environment and water resources, and anthropic issues. The proposal consists in the application of geotechnology to optimize queries and analyses of both the estimated potential (remnant and individualized) and inventoried, based on structuring of spatial information for implementation of automated tools in processes. The survey of the world's most updated research for evaluation of potential hydroelectric indicates a vision of the watershed space study more systemic than potential analyses along stretches of watercourses, currently applied to lift the estimated potential. Unlike the vast majority of developed or developing countries, 75% of the electric energy generation in Brazil is hydropower sourced. It is estimated that only 32% of the Brazilian hydroelectric potential is exploited, leaving approximately 88.2 GW of potential to explore. However, much of this potential is located in protected areas, known as conservation units. In more urbanized areas, the construction of a reservoir can exert strong influences on infrastructure and services of society. The methodologies for these estimates may introduce limitations for inadequacies of information or tools and applied techniques. The greater knowledge of acceptable limits between the sites with hydropower potential, socioeconomic impacts and protection of biodiversity can be fleshed out with the development of tools and techniques to get more transparent and more detailed analyses since the initial phases of the studies. The developed methodology consists in the analysis of digital elevation model for identification of waterfalls, on regionalization of hydrological data and integrated analysis of environment, existing infrastructure and economic factors. Abstraction conversion and structuring data methods were applied, based on spatial statistics, algebra of maps, multivariate data analysis and decision support system for multi-criteria analysis. The tools and techniques used in the study area can be applied to other regions of the Brazilian territory. The models of spatial database of physiographic features, hydrology, environment and infrastructure, used in this work, show discrete and continuous properties and can be applied to regional or national studies. The final results are proposals for structuring information associated to processes in geographic information systems to improve integrated assessments of hydroelectric potential.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE TABELAS | xiv |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | xvi |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO DO PROBLEMA..... | 4 |
| 1.1.1 Hipótese..... | 5 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL..... | 5 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 5 |
| 1.4 ESTRUTURA DA TESE..... | 6 |
| 1.5 FLUXO METODOLÓGICO..... | 7 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 9 |
| 2.1 NOMENCLATURAS E CLASSIFICAÇÕES DE USINAS HIDROELÉTRICAS... | 9 |
| 2.2 POTENCIAL HIDRELÉTRICO NO BRASIL E NO MUNDO..... | 13 |
| 2.2.1 O planejamento do setor elétrico brasileiro..... | 16 |
| 2.2.2 Perspectivas da Matriz Elétrica Brasileira..... | 17 |
| 2.3 <i>FRAMEWORK</i> | 20 |
| 2.4 APLICAÇÕES DE GEOTECNOLOGIAS AOS POTENCIAIS HIDROELÉTRICOS..... | 30 |
| 2.4.1 Variáveis e Indicadores utilizados..... | 32 |
| 2.4.2 Modelos hidrológicos com aplicação de SIG..... | 33 |
| 2.4.2.1 Vazões e Área de contribuição em bacias hidrográficas..... | 35 |
| 2.4.2.2 Extrações dos dados de área de contribuição..... | 38 |
| 2.4.2.3 Interpoladores Kernel e por Krigagem..... | 43 |
| 2.4.2.4 Modelo de Regressão Espacial – GWR..... | 46 |
| 2.4.3 Modelo Digital de Terreno..... | 49 |
| 2.4.3.1 Sensores de RADAR..... | 52 |
| 2.4.3.1.1 Modelo Digital de Elevação – MDE do SRTM..... | 53 |
| 2.4.3.2 Estatística Zonal e Focal..... | 53 |
| 2.4.3.3 Aplicação de estudos geomorfológicos para eixos barráveis..... | 54 |
| 2.4.4 Integração de dados aplicado ao Potencial Hidroelétrico..... | 57 |
| 2.4.5 Análise Multicritério..... | 59 |
| 2.4.5.1 Reconhecimento da Análise multicritério e aplicações..... | 59 |
| 2.4.5.2 Método AHP..... | 61 |
| 2.4.6 SIGWEB..... | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E VARIÁVEIS..... | 65 |
| 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A AVALIAÇÃO DE POTENCIAIS HIDROENERGÉTICOS..... | 71 |
| 3.1 SELEÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DE ESTUDO..... | 71 |
| 3.2 FLUXOS DOS PROCEDIMENTOS..... | 76 |
| 3.3 MATERIAIS..... | 80 |
| 3.3.1 Base de Dados e informações..... | 80 |
| 3.3.2 Informações públicas do setor elétrico brasileiro..... | 82 |
| 3.3.2.1 Eletrobrás..... | 82 |
| 3.3.2.2 ANEEL/EPE..... | 82 |
| 3.3.2.3 IBGE..... | 83 |
| 3.3.2.4 ANA..... | 83 |
| 3.3.2.5 Universidade Federal de Viçosa e RURALMINAS..... | 84 |
| 3.3.2.6 INPE..... | 86 |
| 3.3.2.7 USGS..... | 87 |
| 3.3.3 Compatibilização das informações espaciais..... | 87 |
| 3.3.4 Geração da base de dados e Metadados..... | 88 |
| 3.4 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS..... | 89 |
| 3.4.1 Introdução..... | 89 |
| 3.4.2 Modelo Digital de Elevação do SRTM..... | 89 |
| 3.4.3 Modelo de Declividade..... | 90 |
| 3.4.4 Altura Acima da Drenagem mais Próxima (HAND)..... | 91 |
| 3.4.5 Estatística zonal..... | 93 |
| 3.4.6 Estudo de Caso para identificação preliminar de diferença de níveis em potenciais hidroelétricos..... | 94 |
| 3.4.6.1 Caracterização do aproveitamento hidroelétrico..... | 96 |
| 3.4.6.2 Método de Estatística Espacial para busca semi-automatizada de diferença de níveis altimétricos em cursos d'água..... | 98 |
| 3.4.6 Índice Topográfico..... | 100 |
| 3.5 ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA..... | 101 |
| 3.5.1 Introdução..... | 101 |
| 3.5.2 Localização espacial das informações hidrológicas..... | 102 |
| 3.5.3 Proposta de elaboração de mapa de dados distribuídos de Vazão Média de Longo Período – Q_{mlp} | 104 |
| 3.5.3.2 Regionalização da vazão específica de longa duração na sub-bacia hidrográfica..... | 106 |
| 3.5.3.3 Calculo da vazão média de longo período (Q_{mlp}) pelo método da vazão específica..... | 106 |
| 3.5.3.4 Aplicação da regressão ponderada geograficamente para determinação de Q_{mlp} | 106 |
| 3.5.4 Proposta de elaboração de mapa de dados distribuídos de vazão máxima com período de retorno de 500 anos (Q_{max500})..... | 110 |

| | |
|---|------------|
| 3.5.5 Proposta de elaboração de mapa de dados distribuídos de vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e da vazão mínima para curva de permanência para 95% de probabilidade (Q_{95})..... | 114 |
| 3.6 PROPOSTA DO MAPA DE FAVORABILIDADE AO POTENCIAL BRUTO | 116 |
| 3.7 ANÁLISES ESPACIAIS COM TEMAS DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE..... | 118 |
| 3.8 ANÁLISES E CONSULTAS EM PLATAFORMA DE SIG..... | 119 |
| 3.9 PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DOS DADOS PARA SUPORTE À DECISÃO..... | 121 |
| 3.9.1 Análise Multicritério AHP..... | 121 |
| 3.9.2 Integração dos dados na análise multicritério..... | 122 |
| 3.9.3. Sequência metodológica da aplicação do método AHP..... | 122 |
| 3.9.4 Seleção e priorização de critérios..... | 123 |
| 3.9.5 Critérios propostos na priorização de projetos hidroelétricos..... | 123 |
| 3.9.6 Ponderação dos critérios e subcritérios e descrição..... | 124 |
| 3.9.6.1 Potencialidades e restrições dos Fatores Técnicos..... | 126 |
| 3.9.6.2 Potencialidades e restrições dos Fatores Econômicos e Financeiros..... | 130 |
| 3.9.6.3 Potencialidades e restrições dos Fatores Sociais..... | 132 |
| 3.9.6.4 Potencialidades e restrições dos Fatores Ambientais..... | 134 |
| 3.9.7 Escolha das Alternativas de potenciais hidroelétricos..... | 135 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 137 |
| 4.1 ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA..... | 137 |
| 4.1.1 Regionalização da Vazão Média de Longo Período..... | 137 |
| 4.1.1.1 Vazão Específica de Longo Período..... | 137 |
| 4.1.1.2 Geração do mapa de informações distribuídas das vazões específicas e vazão média de longo período..... | 140 |
| 4.1.1.3 Resultados entre geração do mapa de Q_{mip} pelo método das vazões específicas comparados com os valores do programa Hidrotec..... | 141 |
| 4.1.1.4 Avaliação do mapa de Q_{mip} pelo método GWR..... | 142 |
| 4.1.1.5 Comparação entre o método GWR e o Método do Q_{mip} pela Vazão Específica..... | 143 |
| 4.1.2 Regionalização da Vazão Máxima com Tempo de Retorno de 500 anos (Q_{max500})..... | 144 |
| 4.1.3 Regionalização da Vazão Mínima $Q_{7,10}$ | 147 |
| 4.1.4 Regionalização da Vazão Mínima Q_{95} | 148 |
| 4.1.5 Aplicabilidade do método GWR para regionalização de vazões..... | 150 |
| 4.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS..... | 151 |
| 4.2.1 Mapa de Índice Topográfico..... | 151 |
| 4.2.2 Resultado da pesquisa preliminar de quedas d'água para o caso da UHE Salto Grande..... | 152 |
| 4.2.3 Posicionamento de eixos barráveis..... | 153 |

| | |
|--|------------|
| 4.3 MAPA DE FAVORABILIDADE AO POTENCIAL BRUTO E MAPAS COMPLEMENTARES..... | 155 |
| 4.3.1 Avaliação estatística do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto na bacia do rio Doce..... | 159 |
| 4.3.2 Avaliação estatística do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto nas bacias hidrográficas do Brasil..... | 161 |
| 4.3.3 Resultados do Mapa de Favorabilidade ao potencial bruto..... | 163 |
| 4.4 ANÁLISES ESPACIAIS DE RESERVATÓRIOS COM TEMAS DE INFRAESTRUTURA E DE MEIO AMBIENTE..... | 164 |
| 4.4.1 Avaliações das áreas de inundações dos reservatórios conforme a cota estimada, potencialidades e restrições..... | 164 |
| 4.4.2 Cálculo do volume de armazenamento estimado a partir do polígono do reservatório e do MDE/SRTM..... | 167 |
| 4.4.3 Quantificação de temas de infraestrutura e ocupação de áreas ambientais por meio das análises espaciais..... | 167 |
| 4.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROENERGÉTICO: APOIO À DECISÃO POR PRIORIZAÇÃO DOS POTENCIAIS HIDROELÉTRICOS PELO MÉTODO AHP..... | 168 |
| 4.5.1 Análise de sensibilidade..... | 171 |
| 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 176 |
| 5.1 ABORDAGEM SISTÊMICA DA METODOLOGIA..... | 176 |
| 5.2 APLICABILIDADE DA METODOLOGIA PARA ÁREAS GEOGRÁFICAS NO BRASIL..... | 177 |
| 5.3 APLICABILIDADE DA METODOLOGIA PARA ESCALAS ESPACIAIS..... | 179 |
| 5.4 INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS E TÉCNICAS DE SIG E DO SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO..... | 179 |
| 5.5 REGIONALIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES – VAZÕES E ELEVAÇÃO DO TERRENO..... | 181 |
| 5.6 – RECOMENDAÇÕES..... | 182 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 184 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Esquema conceitual das análises realizadas para obtenção de resultados hidrológicos, topográficos, ambientais e socioeconômico.... | 7 |
| Figura 1.2. Fluxo simplificado dos procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento do estudo..... | 8 |
| Figura 2.1: Etapas de implantação dos aproveitamentos hidroelétricos.... | 17 |
| Figura 2.2. <i>Framework</i> para estudo analítico de potencial hidroelétrico... | 21 |
| Figura 2.3. <i>Framework</i> para análise de localização de sítio para pequena usina hidroelétrica utilizando sistema de informação geoespacial..... | 23 |
| Figura 2.4. Esquema de procedimentos e critérios no levantamento do potencial hidroelétrico..... | 24 |
| Figura 2.5. Esquema de procedimentos e critérios na seleção do potencial hidroelétrico..... | 25 |
| Figura 2.6. Avaliação de potencial de PCH utilizando Sensoriamento Remoto para desenvolvimento sustentável na Índia..... | 26 |
| Figura 2.7. <i>Framework</i> da estrutura de avaliação de máximos potenciais na Bacia do Prata diante de mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável..... | 27 |
| Figure 2.8. <i>Framework</i> das avaliações de ferramentas e técnicas para avaliação de potencial hidroelétrico..... | 28 |
| Figura 2.9. Termos utilizados para a bacia hidrográfica..... | 39 |
| Figura 2.10. Sequência aplicada para geração de mapas derivados do MDE..... | 41 |
| Figura 2.11. Representação da direção de fluxo pelo método D-infinito.... | 43 |
| Figura 2.12. Esquema da associação dos mapas de coeficientes e mapas de variáveis..... | 49 |
| Figura 2.13. Esquema simplificado de aplicação GIS para estimativa de potencial bruto..... | 51 |
| Figura 2.14. Esquema do processamento do algoritmo HAND..... | 56 |
| Figura 2.15. Exemplo de objetivos e critérios para uma nova abordagem de apreciação em investimentos em transportes pelo setor público..... | 60 |
| Figura 2.16. Esquema da diversidade de classificações de métodos de análise multicritério (Multi-Criteria Analysis - MCA Methods)..... | 62 |
| Figura 3.1. Sub-bacias da ANA (Nível 3) e rios principais do HidroWEB. | 72 |
| Figura 3.2. Mapa de precipitação média anual (mm/ano)..... | 74 |
| Figura 3.3. Mapa de precipitação do semestre mais chuvoso (mm/ano)... | 74 |
| Figura 3.4. Fluxo metodológico dos processos aplicados para análises topográficas..... | 76 |
| Figura 3.5. Fluxo metodológico dos processos aplicados para análises hidrológicas..... | 77 |
| Figura 3.6. Fluxo metodológico dos processos aplicados para o mapa de favorabilidade ao potencial bruto hidroelétrico..... | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.7. Fluxo metodológico dos processos aplicados para análise multicritério SIG e AHP..... | 79 |
| Figura 3.8. Informações hidrológicas disponibilizadas na rede hidrográfica da bacia do rio Doce/MG do Atlas Digital das águas de Minas Gerais..... | 85 |
| Figura 3.9. Informações distribuídas de altimetria, canais de drenagem e sub-bacias hidrográficas da bacia do rio Doce..... | 90 |
| Figura 3.10. Informações distribuídas de declividade..... | 91 |
| Figura 3.11. Informações distribuídas de HAND_50..... | 92 |
| Figura 3.12. Amplitude de Altimetria por trecho do canal de rio..... | 93 |
| Figura 3.13. Declividade Média por trecho do canal de rio..... | 94 |
| Figura 3.14. Localização da Usina Salto Grande, extraído de imagens de 6/21/2013 do Google Earth..... | 95 |
| Figura 3.15. Localização da Usina Salto Grande, da altimetria do MDE/SRTM e da hidrografia extraída do MDE/SRTM..... | 95 |
| Figura 3.16. Resumo informativo da Barragem UHE Salto Grande/MG, obtido do banco de informações e mapas de transportes..... | 96 |
| Figura 3.17. Arranjo dos componentes da usina: localização barragem e da casa de força..... | 97 |
| Figura 3.18. Vista em detalhe do Google Earth na área da casa de força da Usina Salto Grande..... | 97 |
| Figura 3.19. Vista em detalhe do Google Earth na área da barragem da Usina Salto Grande..... | 98 |
| Figura 3.20. Esquema ModelBuilder/ArcGIS para elaboração semi-automatizada do mapa de quedas d'água..... | 99 |
| Figura 3.21. Método da menor distância euclidiana..... | 100 |
| Figura 3.22: Mapa de localização das estações fluviométricas da ANA e das informações hidrológicas do Hidrotec..... | 103 |
| Figura 3.23. Mapa de localização das estações fluviométricas da ANA e das informações hidrológicas do Hidrotec..... | 104 |
| Figura 3.24: Informações de Precipitação Média Anual..... | 109 |
| Figura 3.25: Informações distribuídas de área de drenagem a montante.. | 110 |
| Figura 3.26. Informações distribuídas de precipitação do trimestre mais chuvoso..... | 111 |
| Figura 3.27. Informações distribuídas de declividade média por trecho de canal de rio..... | 111 |
| Figura 3.28. Informações distribuídas de comprimento da drenagem à montante..... | 112 |
| Figura 3.29. Posicionamento das estações com informações de Q_{MAX500} .. | 113 |
| Figura 3.30. Informações distribuídas de densidade de drenagem..... | 114 |
| Figura 3.31. Informações distribuídas de precipitação do trimestre mais seco..... | 115 |
| Figura 3.32. Posicionamento das estações com informações de $Q_{7,10}$ e Q_{95} | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.33. Fluxo metodológico dos processos aplicados para o Mapa de Favorabilidade ao potencial bruto hidroelétrico..... | 117 |
| Figura 3.34. Informações espaciais de temas de infraestrutura, unidades de conservação e minorias raciais..... | 118 |
| Figura 3.35. Mapa de dados distribuídos das distâncias euclidianas às linhas de transmissão..... | 119 |
| Figura 3.36. Critérios e sub-critérios usados no estudo e dados aplicados às alternativas..... | 124 |
| Figura 3.37. Mapa de produção de sedimentos na bacia do rio Doce..... | 130 |
| Figura 3.38. Distribuição espacial das alternativas por classes de favorabilidade ao potencial bruto..... | 136 |
| Figura 4.1. BoxPlot das vazões específicas das sub-bacias ANA (Ottobacias nível 3)..... | 138 |
| Figura 4.2. Verificação da não ocorrência de ajuste curvas entre variáveis de área de acumulação e precipitação média relacionada às vazões específicas nas sub-bacias e na bacia hidrográfica..... | 138 |
| Figura 4.3. Interpolação da vazão específica em fronteiras de ottobacias nível 3..... | 140 |
| Figura 4.4. Mapa da vazão média de longo período – Qmlp..... | 141 |
| Figura 4.5. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para Qmlp..... | 143 |
| Figura 4.6. Ajuste do método da vazão específica com os dados do Hidrotec para Qmlp..... | 144 |
| Figura 4.7. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para Qmlp | 144 |
| Figura 4.8. Ajuste do método da vazão específica com o método GWR para Qmlp..... | 144 |
| Figura 4.9. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para Qmax500..... | 145 |
| Figura 4.10. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para $Q_{7,10}$ | 146 |
| Figura 4.11. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para $Q_{7,10}$ | 147 |
| Figura 4.12. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para $Q_{7,10}$ | 148 |
| Figura 4.13. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para Q_{95} . | 149 |
| Figura 4.14. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para Q_{95} | 150 |
| Figura 4.15. Mapa do Índice Topográfico reclassificado em 8 bits..... | 151 |
| Figura 4.16. Mapa de diferenças de níveis altimétricos..... | 152 |
| Figura 4.17. Classes de alturas em relação à drenagem mais próxima..... | 154 |
| Figura 4.18. Classes de amplitudes de alturas em relação à drenagem mais próxima..... | 155 |
| Figura 4.19. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto na bacia do rio | 156 |

| | |
|---|-----|
| Doce..... | |
| Figura 4.20. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto em Ottobacias... | 157 |
| Figura 4.21. Posicionamento dos aproveitamentos hidroelétricos conforme escala de classificação segmentado por desvio padrão em 4 classes..... | 160 |
| Figura 4.22. Detalhe do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Hidroelétrico na região da Usina de Salto Grande..... | 160 |
| Figura 4.23. Ajuste da equação quadrática do Mapa de Favorabilidade x Média da Potência por agrupamento de classes de potência outorgada.... | 162 |
| Figura 4.24. Área de inundações por simulação de reservatórios e relações com fatores econômicos, sociais e ambientais..... | 165 |
| Figura 4.25. Área de inundações por simulação de reservatórios e relações com fatores técnicos..... | 166 |
| Figura 4.26. Esquema conceitual para cálculo de volume de armazenamento do reservatório..... | 167 |
| Figura 4.27. Localização georreferenciada do ranking de priorização por classes de favorabilidade ao potencial bruto hidroelétrico..... | 169 |
| Figura 4.28. Boxplot do valor AHP de priorização por classes de favorabilidade ao potencial bruto..... | 170 |
| Figura 4.29. Boxplot do ranking de priorização por classes de favorabilidade ao potencial bruto..... | 170 |
| Figura 4.30. Análise de sensibilidade pela variação de pesos dos critérios: situação inicial de ponderação dos critérios..... | 172 |
| Figura 4.31. Análise de sensibilidade pela variação de pesos dos critérios: situação final de ponderação dos critérios pela valorização do fator econômico-financeiro..... | 172 |
| Figura 4.32. Detalhe da alteração do ranking de prioridade de escolhas de potencial hidroelétrico pela priorização do fator econômico-financeiro.. | 174 |
| Figura 4.33. Sensibilidade dinâmica para o primeiro grupo de critérios..... | 175 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1. Classificação das PCH quanto à potência instalada e quanto à altura de queda de projeto..... | 12 |
| Tabela 2.2. Cenários de expansão do setor hidrelétrico em alguns países em desenvolvimento..... | 14 |
| Tabela 2.3. Geração de hidreletricidade no Brasil por bacia hidrográfica.. | 15 |
| Tabela 2.4. Projeção do potencial de geração dos recursos hídricos em GW..... | 15 |
| Tabela 2.5. Emissões de CO ₂ de diferentes fontes de geração (em Kg por MWh)..... | 19 |
| Tabela 2.6. Seleção de variáveis e indicadores utilizados nos estudos de Potencial Hidroelétrico com aplicação de SIG e SAD..... | 32 |
| Tabela 2.7. Modelos de Regressão testados para estimar vazão anual.... | 37 |
| Tabela 2.8. Processos para dados fisiográficos das bacias a partir do MDE..... | 40 |
| Tabela 2.9. Sistemas SIG com Atlas na WEB sobre Potenciais Hidroelétricos..... | 63 |
| Tabela 3.1. Regiões hidrográficas da bacia do rio Doce..... | 73 |
| Tabela 3.2. Base de Informações para seleção das áreas de prospecção de hidroelétricas..... | 81 |
| Tabela 3.3. Temas e classes dos atributos extraídos das bases de dados do SIGEL..... | 82 |
| Tabela 3.4. Temas, classes do atributo e nomenclatura da informação hidrográfica da ANA..... | 84 |
| Tabela 3.5. Classes e nomenclatura da informação hidrológica do Hidrotec em locais do rio..... | 85 |
| Tabela 3.6. Variáveis explicativas para regionalizações de vazões médias e vazões extremas..... | 102 |
| Tabela 3.7. Nomenclatura adotada para o relatório de sumário estatístico do modelo GWR..... | 108 |
| Tabela 3.8. Escala Saaty de importância relativa..... | 124 |
| Tabela 3.9. Critérios AHP para priorização de potenciais em estágio de prospecção..... | 125 |
| Tabela 3.10. Distribuições por classe de Favorabilidade ao Potencial Bruto..... | 136 |
| Tabela 4.1. Informações hidrométricas do programa Hidrotec, fisiográficas e climáticas nas sub-bacias..... | 139 |
| Tabela 4.2. Estatística descritiva dos resíduos Q _{mlp} pelo método GWR e pelo método da vazão específica..... | 141 |
| Tabela 4.3. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 497 informações hidrológicas do programa Hidrotec para Q _{mlp} | 142 |
| Tabela 4.4. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de Q _{mlp} | 142 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.5. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 418 informações hidrológicas do programa Hidrotec para Q_{max500} | 145 |
| Tabela 4.6. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de Q_{max50} | 145 |
| Tabela 4.7. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 418 informações hidrológicas do programa Hidrotec para $Q_{7,10}$ | 147 |
| Tabela 4.8. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de $Q_{7,10}$... | 147 |
| Tabela 4.9. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 418 informações hidrológicas do programa Hidrotec para Q_{95} | 148 |
| Tabela 4.10. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de Q_{95} ... | 149 |
| Tabela 4.11. Estatística descritiva dos números digitais dos potenciais hidroelétricos sobre o mapa de favorabilidade ao potencial bruto..... | 159 |
| Tabela 4.12. Estatística descritiva do número digital do mapa de favorabilidade para aproveitamentos de PCH e UHE..... | 161 |
| Tabela 4.13. Correlações com coeficiente de Pearson para combinações de classes..... | 161 |
| Tabela 4.14. Ajuste de grupos de classes para ajuste de equação Mapa de Favorabilidade x Potência Outorgada..... | 162 |
| Tabela 4.15. Correlações entre Potência outorgada, mapa de favorabilidade, vazão média reclassificado e índice topográfico reclassificado por aproveitamento hidroelétrico..... | 163 |
| Tabela 4.16. Posicionamentos das Alternativas após a análise AHP..... | 169 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------------|--|
| AAI | Análise Ambiental Integrada |
| AHP | Processo Hierárquico Analítico (Analytical Hierarchical Process) |
| AIC | Critério Akaike de Informação |
| AMBData | Banco de dados de informações ambientais e do clima (INPE) |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ArcGIS | Sistema de Informação Geográfica desenvolvido pela ESRI® |
| ArcHydro | Aplicativo hidrológico da ESRI |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| BIG | Banco de Informações de Geração |
| BIRD | Banco Interamericano de Desenvolvimento |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| SCS/CN | Número de Curva do Soil Conservation Service |
| CNPQ | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| CO ₂ | Gás Carbônico |
| COPASA | Companhia de Saneamento de Minas Gerais |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| CR | Taxa de consistência dos pesos dos critérios da AHP |
| DOE | Departamento de Energia dos Estados Unidos da América |
| Eletróbrás | Centrais Elétricas Brasileiras S.A. |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| ESHA | Associação Europeia de Pequenas Centrais Hidroelétricas |
| ESRI | Environmental Systems Research Institute |
| EUA | Estados Unidos da América |
| ExpertChoice | Aplicativo multicritério distribuído pela Expert Choice INC. |
| F | Indicador do nível de estratificação – número de Froude |
| <i>Framework</i> | Arcabouço |
| FUNAI | Fundação Nacional do Índio |
| Fuzzy | Lógica difusa para admitir valores intermediários |
| GNSS | Sistema de Navegação Global por Satélite |
| Google Earth | Aplicativo para visualização por imagens de satélites e mapas |
| Grade (<i>Grid</i>) | Matriz (de células), imagem digital ou tipo matricial (raster) |
| GW | Giga Watts (medida de potência equivalente a 10 ⁶ kW) |
| GWR | Regressão Ponderada Geograficamente (método automatizado) |
| h | Altura (altura de queda) |
| HAND | Distância vertical à drenagem mais próxima |
| HEC | Hydrologic Engineering Center – série de aplicativos hidrológicos |
| HIDROTEC | Programa que disponibiliza o Atlas Digital das Águas de Minas Gerais |
| HidroWEB | Sistema de Informações Hidrológicas da ANA |
| HMS | Hydrologic Modeling System |
| Href | Queda de referência |

| | |
|--------------|---|
| Hydrospot | Aplicativo de avaliação de potenciais hidroelétrico (IPH/CNPQ) |
| IET | Índice do Estado Trófico |
| IGAM | Instituto Mineiro de Gestão das Águas |
| IHA | Associação Internacional de Hidroelétricas |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| INPE | Instituto de Pesquisas Espaciais |
| IS | Índice de Sedimentação |
| kW | Quilowatts (medida de potência) |
| kWh | Quilowatts-hora (medida de energia) |
| LDD | Direções locais da drenagem |
| LIDAR | Light Detection and Ranging |
| m | Metro |
| MAUT/MAVT | Método multicritério de utilização por múltiplos atributos |
| MCA | Análise multicritério |
| MCDM | Método de decisão multicritério |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDE/SRTM | Modelo Digital de Elevação gerado pelo Programa SRTM |
| MDT | Modelo Digital do Terreno |
| Metadados | Informações sobre os dados |
| Minitab | Aplicativo de estatística distribuído pela Minitab Inc. |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| ModelBuilder | Modelador de processos do aplicativo ArcGIS da ESRI |
| MAOT | Método multicritério de utilização por múltiplos objetivos |
| MW | Mega Watts (medida de potência equivalente a 10^3 kW) |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NOAA | Administração Nacional Oceânica Atmosférica |
| ND | Número Digital, intensidade do pixel, sua amplitude muda de acordo com a resolução radiométrica (do sensor) |
| OMM | Organização Meteorológica Mundial |
| ONS | Operador Nacional do Sistema |
| Ottobacias | Subdivisão de bacias hidrográficas proposto por Otto Pfastetter |
| PCH | Pequenas Centrais Hidrelétricas |
| PCH | Pequena Central Hidrelétrica |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PIR | Planejamento Integrado de Recursos |
| PMBok | Corpo de conhecimentos do PMI |
| PMI | Instituto de Gerenciamento de Projetos |
| Q | Vazão |
| RADAR | <i>Radio Detecting And Ranging</i> |
| RMR | Sistema de classificação de massa da rocha |
| RQD | Índice de Qualidade da Rocha |
| RURALMINAS | Fundação Rural Mineira |
| SAD | Sistema de Apoio à Decisão |

| | |
|---------------------|--|
| SHP | Small Hydropower |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SIGEL | Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico |
| SIPOT | Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro |
| SNIRH | Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos |
| SRTM | Shuttle Radar Topographic Mission |
| <i>Stakeholders</i> | Todos os intervenientes no projeto |
| TEP | Toneladas Equivalentes de Petróleo |
| TIN | Rede Irregular de Triângulos |
| TWh | Tera Watts-hora (medida de energia) |
| UE | União Europeia |
| UFV | Universidade Federal de Viçosa |
| UHE | Usina Hidroelétrica |
| USGS | United States Geological Survey |
| UTM | Sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais Universal Transversa de Mercator |
| Valor P | Nível de significância com a qual se aceita a hipótese nula do regressor |
| VIF | Variance Inflation Factor – verifica multicolinearidade no GWR |
| WEB | Rede de alcance mundial |
| WGS | Elipsóide de origem geocêntrica utilizado pelo GNSS |
| World Climate | Conjunto de planos de informações matriciais sobre o clima |

1 INTRODUÇÃO

Entre todas as formas de energia, a eletricidade é a que melhor se adapta e se insere na vida moderna, a ponto de ser considerado um dos principais pontos-chave para o desenvolvimento de uma sociedade, pois provê luz, calor e força motriz para a cadeia produtiva, de comunicação e de lazer e consumo (ESHA, 2006). De fato, a energia elétrica é a fonte mais nobre e mais versátil, estando presente em quase todos os usos energéticos finais dos consumidores (FILHO, 2013). O motivo de a eletricidade ser considerada uma “energia nobre” está alicerçado na sua possibilidade de transmissão com o mínimo de perdas, desde a geração até o consumo.

Segundo o governo federal brasileiro:¹ "O Brasil possui a matriz energética mais renovável do mundo industrializado, com 45,8 % de sua produção proveniente de fontes como recursos hídricos, biomassa e etanol, além das energias eólica e solar". Dessa parcela de geração de energia elétrica, as grandes usinas hidrelétricas são responsáveis por mais de 75% da eletricidade do país (MME/EPE, 2007). No Brasil, entre 1973 e 2011, o consumo de eletricidade cresceu a uma taxa média de 5,8% ao ano, enquanto a demanda total energética foi de 3,2%, e o PIB, de 3,4%, valores bem superiores aos verificados no mundo (Associação Interesse Nacional, 2013). O consumo residencial no Brasil evoluiu, em média, 6,3%, enquanto o industrial cresceu 4,0%, evidenciando um maior uso social da energia (Associação Interesse Nacional, 2013).

Segundo as estimativas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE),² até 2030 a geração de energia hidrelétrica representará 67,5% do total de 130,8 GW que se pretende instalar no país entre 2005 e 2030, considerando todas as demais fontes térmicas a gás e carvão, nucleares, eólicas, biomassa, solar, etc. Para essa época, as hidrelétricas contribuirão com cerca de 74% da eletricidade gerada no país, patamar próximo ao de hoje. Atualmente, estima-se que apenas 32% do potencial hidrelétrico brasileiro é inventariado (MME/EPE, 2007).

O mundo consumiu em 2011 cerca de 13 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP), representando 48 vezes a demanda brasileira de energia. Desse montante, 81% são oriundos de combustíveis fósseis, responsáveis por emissões de CO₂ da ordem de 31 bilhões de toneladas – 65% das emissões globais mundiais. Uma expressiva fração da demanda mundial de energia, mais precisamente 37%, ou 4,8 bilhões de TEP, foi destinada à geração de energia elétrica, resultando em 22 mil terawatts/hora (TWh) gerados, equivalentes a 39 vezes o montante gerado no Brasil.³ Até 2002, ainda existia cerca de 70% do potencial hidrelétrico economicamente viável para ser explorado no mundo. Atualmente, alguns países deixam de explorar pequenos potenciais

¹Matriz energética brasileira. Acesso em: 02/08/2013. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/cop/panorama/o-que-o-brasil-esta-fazendo/matriz-energetica>>.

² Matriz Energética Nacional 2030. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_energetica_nacional_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf>.

³ Energia elétrica no Brasil: contexto atual e perspectivas. Disponível em: <http://interessenacional.uol.com.br/index.php/edicoes-revista/energia-eletrica-no-brasil-contexto-atual-e-perspectivas/>, acesso em 02/08/2013.

hidrelétricos por não terem uma adequada abordagem e pela ausência de viabilidade econômica (YI *et al.*, 2010).

Para o caso do Brasil, grande parte do potencial hidrelétrico estimado encontra-se em áreas protegidas por regulamentos ambientais ou apresentaria impeditivos de ordem socioeconômica ou técnica para sua transformação e aproveitamento. Para quantificar de modo mais realístico o potencial hidrelétrico, são necessários dados e informações ambientais e antrópicas bastante acurados, bem como a aplicação de ferramentas e técnicas que expressem com maior rigor a avaliação do potencial estimado e inventariado, consideradas as fragilidades técnicas, econômicas e ambientais integradas.

Nesse contexto, o potencial hidrelétrico brasileiro definido pela Eletrobrás (2012) é composto pela soma do potencial estimado (remanescente + individualizado) e do potencial inventariado. O valor do potencial inventariado tem mais possibilidade de ser implementado. Portanto, este corresponde à soma do potencial de projetos identificados em bacias hidrográficas já inventariadas e do potencial dos estudos de viabilidade e de projeto básico, além do potencial de usinas já em construção e em operação.

Conforme Larentis (2009), os estudos de inventário de potencial hidrelétrico no Brasil passaram recentemente por um período sem novos investimentos, limitando a análise da oferta de curto e médio prazos de hidroeletricidade no país (BIRD, 2008), ao mesmo tempo em que não foram produzidos novos estudos de prospecção. Os estudos de inventário passaram a ser reavaliados sob a ótica ambiental, por meio de estudos de avaliação ambiental integrada. De acordo com o autor, esses estudos, no entanto, têm sido empregados de tal forma que aspectos energéticos e ambientais são avaliados em ocasiões diferentes, em análises totalmente desconexas.

A Análise Ambiental Integrada (AAI) para empreendimentos hidroelétricos seria ferramenta necessária para proporcionar uma maior inserção da componente ambiental na etapa de prospecção de sítios com potencial hidro energético na escala de bacia hidrográfica, permitindo que algumas decisões de projetos pudessem ser condicionadas por critérios econômicos, energéticos e socioambientais (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2005). Tecnicamente, a AAI objetiva

avaliar a situação ambiental da bacia com os empreendimentos hidrelétricos implantados e os potenciais barramentos, considerando: (i) seus efeitos cumulativos e sinérgicos sobre os recursos naturais e as populações humanas; e (ii) os usos atuais e potenciais dos recursos hídricos no horizonte atual e futuro de planejamento, tendo em conta a necessidade de compatibilizar a geração de energia com a conservação da biodiversidade e manutenção dos fluxos gênicos, a sociodiversidade e a tendência de desenvolvimento socioeconômico da bacia, à luz da legislação e dos compromissos internacionais assumidos pelo governo federal (XAVIER, 2010).

Conforme Santos (2011), as aplicações de SIG na AAI promoveram avanços no que diz respeito à qualidade dos diagnósticos, das análises, dos relatórios e das diretrizes nas políticas públicas ambientais. As práticas utilizadas no Brasil aproximam-se das melhores práticas internacionais, entretanto os resultados brasileiros demonstram que a AAI não alcançou a efetiva “integração” prevista. Entre as razões destacam-se

aspectos organizacionais, em que os setores envolvidos carecem de investimentos em infraestrutura organizacional, tecnológica e capacitação profissional, e aspectos do rigor legal aos critérios procedimentais frente à baixa disponibilização de informações qualificadas.

Assim, a possibilidade de avaliações integradas de análises espaciais que envolvam aspectos técnicos, econômico-sociais, legais e ambientais se torna cada vez mais um fator imperativo em estudos de potenciais hidrelétricos. Em vários países, este é o processo de avaliação considerado o mais adequado para a caracterização do potencial energético e de sua sustentabilidade (KIER, 1992; PAISH, 2002; KWON e KIM, 2006; ROJANAMON *et al.*, 2009; CONNOLLY *et al.*, 2010; YI *et al.*, 2010).

Na Comunidade Europeia existem programas de incentivo para o desenvolvimento de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) (PAISH, 2002). Sob o aspecto de políticas setoriais, a demanda mundial por energia tem impulsionado países em desenvolvimento a avançar no aproveitamento dos potenciais hidrelétricos, a exemplo da China, do Brasil, da Índia e da Turquia (BALLAT, 2007; BRASIL, 2007a; BRASIL, 2007b; VICTOR e HELLER, 2007; MIRZA *et al.*, 2008; OZTURK *et al.*, 2009) apud Larentis (2009).

Quanto à vulnerabilidade e à sustentabilidade na geração hidrelétrica, pesquisas apontam para a importância das alterações de variáveis internas e externas devido a mudanças climáticas e para os riscos de redução das vazões e dos níveis dos reservatórios (ANDRADE *et al.*, 2012). Estudos recentes publicados pela International Hydropower Association (IHA, 2010) em cooperação com grupos do Fórum de Avaliação de Sustentabilidade Hidroenergética desde março de 2008, resultaram na elaboração do *Protocolo de avaliação de sustentabilidade hidroenergética*, publicado em novembro de 2010, que recomenda abordagens multicritérios.

Instituições públicas do setor elétrico têm aperfeiçoado suas bases de informação nos últimos anos. A Eletrobrás desenvolveu o Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (Sipot) (ELETROBRÁS, 2012) com o objetivo de armazenar e processar informações sobre estudos e projetos de usinas hidrelétricas. A Aneel criou o Banco de Informações de Geração (BIG) para divulgar *on-line* uma série de dados que a Agência reúne sobre o parque gerador brasileiro. Segundo a Aneel, sua criação faz parte de um programa que visa a universalizar e a uniformizar as informações, dando pleno conhecimento a agentes do mercado, investidores estrangeiros e nacionais, autoridades governamentais, bem como à sociedade em geral, acerca da geração de energia elétrica no Brasil.

O Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico⁴ (SIGEL) foi concebido pela Aneel com o intuito de que viesse a tornar-se um instrumento de referência na busca de informações consistentes, de caráter geral, relativas às atividades fins do setor, tornando disponíveis e consolidados em um mesmo ambiente computacional, dados e informações disseminadas em vários subsistemas isolados de interesse corporativo desenvolvido interna ou externamente.

⁴ Sistemas de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico Brasileiro. Disponível em: <http://sigel.aneel.gov.br/>.

Apesar da grande quantidade de informações existente a respeito de geração hidroelétrica, há insuficiência em termos qualitativos de dados, pouca padronização para disponibilização, metodologias desconhecidas, ausência de metadados, problemas com acurácia e completeza, bem como erros relacionados à implementação de procedimentos. Em algumas situações verifica-se que a ausência de certas variáveis nas bases de dados inviabiliza análises espaciais. A proposta da Aneel é que o Sigel possa evoluir para se tornar o Portal do Setor Elétrico Nacional, no qual todos os seus integrantes, sejam eles entes públicos ou parceiros da área privada, teriam direitos e obrigações no sentido de consultar, alimentar e manter atualizado um banco de dados unificado sobre todas as atividades correlatas ao setor, respeitadas as atribuições e as responsabilidades institucionais de cada ente ou parceiro.

Quanto aos processos aplicados para análises, verifica-se que as práticas atuais se baseiam em estágios sequenciados de análises, que variam entre especialistas e instituições. Em diversas situações as decisões de projetos conflitam com licenciamentos ambientais. A análise do potencial com variáveis integradas na mesma base de dados espaciais pode reduzir o tempo de análise e mitigar erros por ausência de informações. Segundo o BIRD (2008) apud Larentis (2009), deve-se considerar ainda que os prazos internos de um empreendimento atendam a demandas comerciais e financeiras, sem qualquer vínculo com o trâmite do licenciamento ambiental, decorrendo disso a constante pressão sobre a análise técnica dos órgãos licenciadores.

1.1 MOTIVAÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente as ferramentas de geoprocessamento possibilitam análises em bases de dados contínuos capazes de processar planos de informações de bacias hidrográficas ou conjuntos de bacias hidrográficas. A disponibilidade de bases de dados com informações do modelo digital de elevação, da topologia da rede hidrográfica, das estações hidrométricas, do meio ambiente e do meio antrópico (rodovias, ferrovias, obras de arte, áreas de irrigação, áreas urbanizadas etc.) permitem que análises complexas sejam realizadas na simulação da construção de barramentos nos cursos d'água e avaliações dos diversos impactos.

Verifica-se que há possibilidade de análises com baixo custo e maior exatidão nos resultados de estimativa do potencial hidrelétrico, mas para isso os parâmetros e as variáveis utilizadas precisam ser mais bem avaliadas. Portanto, faz-se necessário melhor conhecimento das variáveis aplicadas em processos predefinidos, visando ao aperfeiçoamento das avaliações de potencial hidrelétrico. Informações de qualidade facilitam a comunicação entre os tomadores de decisão, sociedade e comunidade local diretamente atingida pelos impactos.

Tais considerações abrem oportunidades para novas pesquisas e desenvolvimentos. As tecnologias de geoprocessamento podem alterar profundamente as práticas atuais de avaliação de potenciais hidrelétricos, seja na fase de estimativa (remanescente ou individualizada) seja na de inventário. As novas possibilidades das análises de potenciais hidrelétricos com ferramentas de geoprocessamento podem reduzir tempo e

esforços, além de proporcionar análises mais acuradas. Existe possibilidade a baixo custo de reduzir-se o espaço entre o conhecimento do potencial na fase de estimativa e na fase de inventário.

1.1.1 Hipótese

Um Mapa de Favorabilidade à locação de potenciais hidrelétricos e mapas derivados de bases digitais podem aperfeiçoar a estimativa de potenciais hidrelétricos e apoiar posteriormente a análise de inventário? Esses mapas podem ser construídos com base nas informações georreferenciadas da hidrologia, do modelo digital de elevação, da geologia de engenharia, do meio ambiente e da infraestrutura, disponíveis em bases de dados públicos, em associação com ferramentas e técnicas de análises espaciais e “escolhas dirigidas por critérios de preferência”,⁵ sendo processadas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG)?

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral consiste em uma proposta metodológica, sua aplicação e desenvolvimento de metodologias para a geração de modelos de favorabilidade ao potencial hidroenergético em escala nacional e regional, empregando informações ambientais. Para isso, será apresentado um estudo de caso utilizando a bacia do rio Doce, considerada aqui uma bacia representativa. Estabelecer critérios e metodologias para identificar sítios favoráveis ao aproveitamento de energia hidrelétrica na escala de bacia hidrográfica; delimitar variáveis com abrangência do território brasileiro utilizáveis em análises por múltiplos critérios, contemplando fatores topográficos, hidrológicos, geológicos, ambientais e de infraestrutura.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar variáveis espaciais disponíveis na WEB geradas por instituições públicas, com abrangência no território brasileiro, que possam identificar informações hidrológicas, fisiografia do relevo, unidades de conservação nas esferas federal, estadual e municipal e infraestrutura de obras antrópicas, de forma que essas variáveis possibilitem a identificação de potenciais hidrelétricos para aplicação em escala nacional.
- Gerar uma base de dados georreferenciados aplicáveis a processos metodológicos para identificar sítios favoráveis ao potencial bruto de hidroenergia.

⁵ Termo extraído do capítulo “Considerações finais” da tese de doutorado *Prospecção do potencial hidrelétrico remanescente*, de D. G. Larentis, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dezembro de 2009.

- Avaliar a aplicação de técnicas de álgebra de mapas e análises estatísticas espaciais para identificação de informações componentes do potencial bruto de energia hidroelétrica.
- Propor metodologia de prospecção⁶ de potencial estimado, utilizando de forma integrada as variáveis disponíveis levantadas, realizada com base em mapas derivados e em base de dados espaciais, aplicando técnica de análise por múltiplos atributos em alternativas discretas.
- Propor uma base de dados em escala de bacia hidrográfica, processos automatizados e semiautomatizados aplicados ao SIG e mapas digitais georreferenciados, para apoiar avaliações ambientais integradas na priorização de inventários hidrelétricos em ambiente SIG.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho é composto pelas seguintes etapas: Introdução, Fundamentação teórica, Procedimentos metodológicos para avaliação de potenciais hidrenergéticos, Resultados, Discussões, Conclusões e Recomendações. Na Introdução é apresentada a importância da energia elétrica no contexto mundial como uma das formas de energia nobre e renovável, bem como o estágio em que o Estado vem desenvolvendo a exploração dos potenciais hidroenergéticos para geração de energia elétrica. Os objetivos geral e específicos alinham-se com a necessidade de análises integradas, com adequado rigor de posicionamento espacial e de atributos no momento da prospecção do potencial hidrelétrico, evitando esforços mais detalhados de estudos técnicos sem a visão sistêmica decorrente de fatores do meio ambiente e antrópicos.

Na Fundamentação teórica são descritas as recentes pesquisas realizadas no Brasil e no mundo assim como os avanços no campo das geotecnologias que são úteis às avaliações de potencial hidrelétrico. Esses avanços podem reduzir o tempo de pesquisas e os custos associados quando os esforços são voltados para disponibilização e estruturação de bases de dados espaciais em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Na fundamentação teórica são abordadas as variáveis utilizadas por especialistas para localização de sítios com potenciais hidrelétricos. Também são apresentadas as ferramentas e as técnicas mais aplicadas para integrar componentes ambientais e socioeconômicos aos estudos de potencial bruto, no qual as variáveis hidrológicas e topográficas predominam.

Nos Procedimentos metodológicos são aplicadas as melhores práticas mundiais orientadas para análises espaciais em ambiente SIG, a saber: interpoladores, álgebra de mapas, análises espaciais de vizinhança e métodos de análise multicritério em escala de bacia hidrográfica. As variáveis utilizadas foram restritas àquelas em que os

⁶ Adotando-se a nomenclatura utilizada em Larentis (2009) optou-se por utilizar o termo “prospecção” referindo-se *lato sensu* às atividades desenvolvidas nas etapas iniciais de planejamento hidrelétrico, conhecidas por “estimativa” e “inventário de potencial hidrelétrico”. O inventário hidrelétrico gerado pela metodologia, produto da seleção de alternativas de projeto, é referenciado como “divisão final de quedas” ou simplesmente “conjunto”.

dados públicos podem ser obtidos em escala regional ou nacional, considerando a disponibilidade e a qualidade das informações (linhagem, acurácia, consistência lógica, completude, precisão, erro).

Nos resultados e nas discussões são relatados os problemas encontrados, os aspectos qualitativos de informação orientada à aplicação em SIG, as limitações dos estudos, os resultados alcançados e as comprovações no tratamento dos dados e na apresentação do mapa de favorabilidade para o potencial hidroelétrico. As recomendações dizem respeito aos avanços que podem ser obtidos para a maior efetivação das análises integradas de inventário por meio dos conceitos de avaliação ambiental integrada⁷ e de análise múltiplos atributos em *Analytical Hyerarquical Process* (AHP)⁸.

1.5 FLUXO METODOLÓGICO

O fluxo metodológico foi dividido em esquema conceitual das análises realizadas (Figura 1.1) e fluxo simplificado dos procedimentos metodológicos (Figura 1.2). A análise do Potencial Bruto da Energia Hidrelétrica deve ser associada aos fatores socioeconômico-ambientais por meio de múltiplos critérios para que a proposta de tomada de decisão na fase de prospecção (estimativa e inventário) seja baseada em fatores hidrológicos, topográficos e ambientais (meios biótico, abiótico e antrópico).

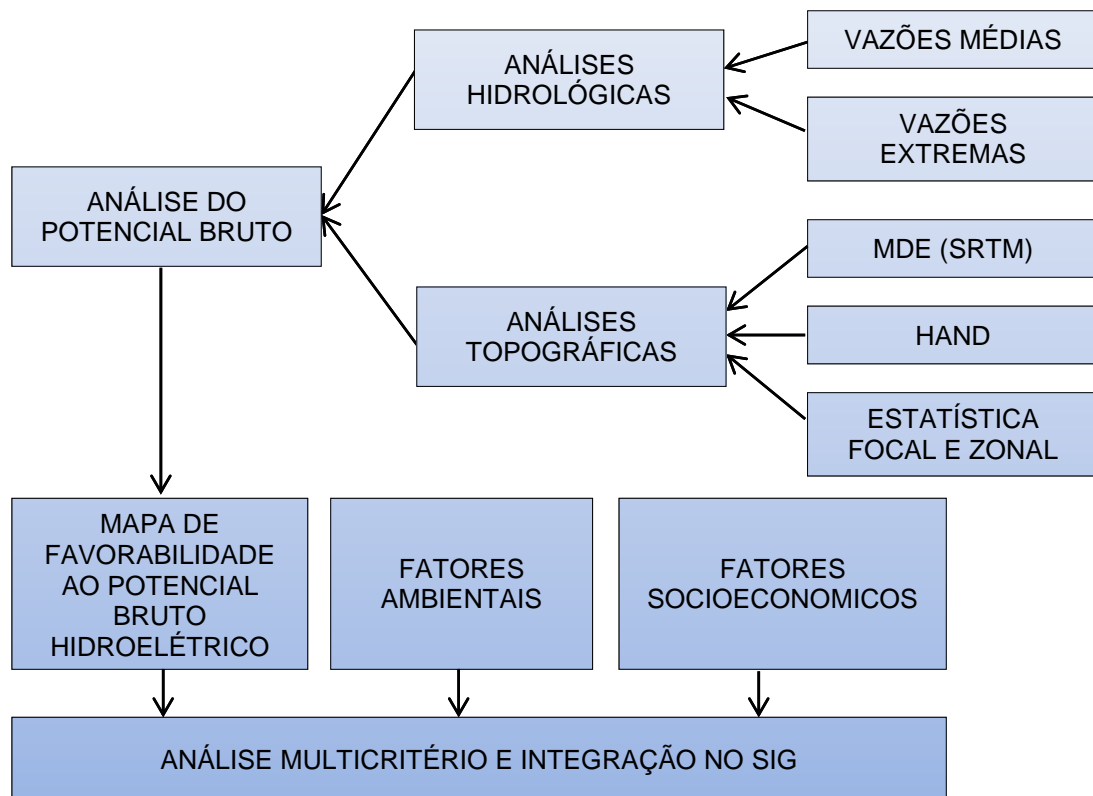


Figura 1.1. Esquema conceitual das análises realizadas para obtenção de resultados hidrológicos, topográficos, ambientais e socioeconômicos.

⁷ Proposto por Biswas (2004).

⁸ O método AHP é considerado um procedimento adequado e eficaz para valorar os recursos naturais (DOMÉNECH e ROMERO, 1999).

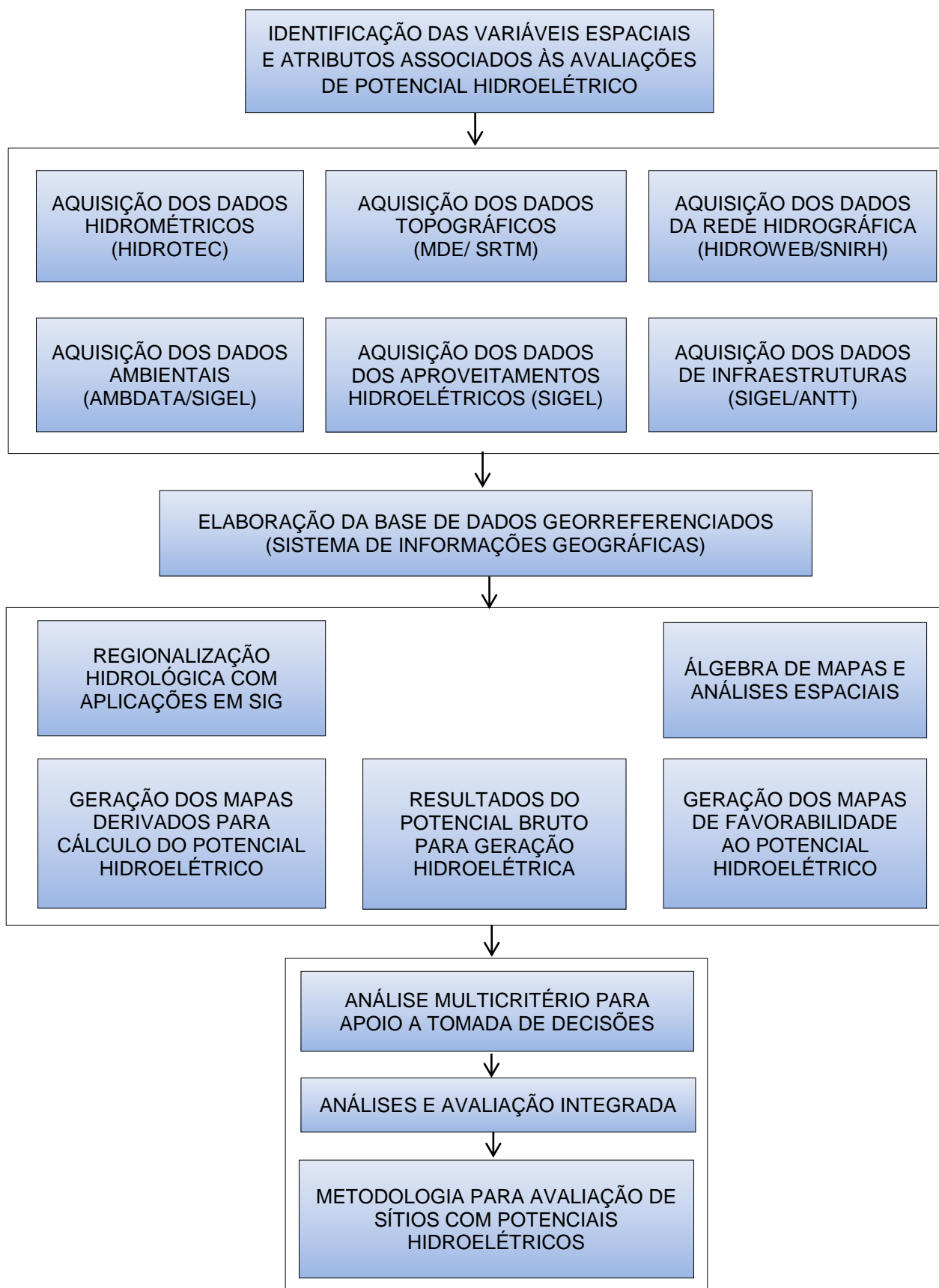


Figura 1.2. Fluxo simplificado dos procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 NOMENCLATURAS E CLASSIFICAÇÕES DE USINAS HIDROELÉTRICAS

As definições de Potência e Energia são relevantes para o entendimento da nomenclatura utilizada nas pesquisas de potencial hidroelétrico e no conhecimento dos bancos de dados de potencial hidro energético. As definições aqui apresentadas são adotadas pelas instituições públicas brasileiras:

Energia Firme: corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida supondo a ocorrência da seqüência mais seca registrada no histórico de vazões do rio onde está localizada. A ONS adota como referência a energia média gerada no “período crítico” do Sistema Interligado Nacional, iniciando em junho de 1949 e terminando em novembro de 1956. Período Crítico é o maior período de tempo em que os reservatórios, partindo cheios e sem reenchimentos totais, são deplecionados ao máximo, estando o sistema submetido à sua energia firme. (MME, 2004).

Energia Assegurada: é a máxima energia que uma usina pode fornecer durante seu pior ciclo hidrológico com uma dada demanda máxima. No sistema interligado relaciona-se a uma configuração de referência, consiste na determinação da oferta global de energia e se faz por meio da simulação estática da configuração hidrotérmica, considerando riscos de não atendimento à carga, supondo quatro subsistemas interligados (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul). Emprega-se o modelo NEWAVE3 para simulação. (MME, 2004).

A Potência Assegurada (PA) de uma usina hidrelétrica é calculada com base em sua potência garantida (PG). Para a determinação da potência assegurada de uma usina deve-se considerar a sua potência disponível (PD) quando a usina estiver completamente motorizada, abatida de seu consumo próprio (CP) e de sua parcela da reserva de potência (RP). (MME, 2004).

A Potência Garantida (PG) de uma usina hidrelétrica é definida como o valor correspondente a 95% de permanência de todos os valores mensais de potência, para todo o histórico de vazões, obtidos a partir da mesma simulação que determinou o valor da energia firme da usina, ou seja, a simulação com o modelo estático a usinas individualizadas (MME, 2004).

Potência Bruta de uma usina hidroelétrica é o produto da aceleração da gravidade pela altura topográfica e pela vazão da água na turbina (MARTINEZ *et al.*, 2006).

Potência Instalada: capacidade bruta (kW) que determina o porte da central geradora para fins de outorga, regulação e fiscalização, definida pelo somatório das potências elétricas ativas nominais das unidades geradoras principais da central; a potência elétrica ativa nominal de uma unidade geradora é definida como a máxima potência elétrica ativa possível de ser obtida nos terminais do gerador elétrico, respeitados os

limites nominais do fator de potência, e comprovada mediante dados de geração ou "ensaio de desempenho"⁹.

Potência Líquida: potência elétrica ativa (kW) máxima disponibilizada pela central geradora, definida em termos líquidos no seu ponto de conexão, ou seja, descontando da potência bruta gerada o consumo em serviços auxiliares e as perdas no sistema de conexão da central geradora e comprovada mediante dados de geração ou "ensaio de desempenho".

Potência Efetiva do Conjunto: é a potência nominal de cada máquina de um determinado conjunto de máquinas da usina. No entanto, de acordo com a altura de queda (líquida) e com a vazão turbinada, a potência gerada varia dentro de determinados limites. (ELETROBRÁS, 2000).

Altura de Queda Bruta: mede a diferença entre a cota da superfície de água do reservatório e a cota do canal de fuga. Não são consideradas as perdas hidráulicas existentes da tubulação. (ELETROBRÁS, 2000).

Altura de Queda Líquida: a queda líquida disponível em uma usina hidrelétrica depende dos níveis d'água a montante e a jusante da usina, ou seja, do nível do reservatório e do nível do canal de fuga (queda bruta), mas varia com a operação da usina. Para o projeto das turbinas de uma usina hidrelétrica, quatro parâmetros básicos são determinados: queda de referência, de projeto, máxima e mínima. (ELETROBRÁS, 2000).

Altura de Queda Nominal do Conjunto: é a altura de queda atribuída ao projeto da usina e da consequente disposição das turbinas no interior da casa de máquinas. (ELETROBRÁS, 2000).

Queda de referência (H_{ref}): a queda líquida para a qual a turbina, com abertura total do distribuidor, fornece a potência máxima do gerador. A queda de referência é dimensionada para a permanência de 95% do tempo na curva de distribuição de quedas da usina, em simulação para todo o histórico de vazões. Este critério considera que, em 95% do tempo, a turbina deve ser capaz de fornecer a potência nominal do gerador. (ELETROBRÁS, 2000).

As **classificações de usinas** facilitam as abordagens do estudo de prospecção de potenciais hidroelétricos. Conforme ELETROBRÁS (2000), as usinas hidroelétricas podem ser classificadas (i) quanto à capacidade de geração de energia; (ii) quanto à capacidade de regularização do reservatório; (iii) quanto ao sistema de adução e (iv) quanto à potência instalada e queda .

⁹ Resolução Normativa nº 420 de 30/11/2010 / ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (D.O.U. 08/12/2010), http://www.aneel.gov.br/cedoc/aren2010420_2.pdf, acessado em 20/8/2013.

(i) capacidade de geração de energia: existem 3 (três) tipos de usinas hidrelétricas, que são classificadas de acordo com a sua capacidade de geração de energia:

- **Micro-usina Hidrelétrica:** pequenas usinas hidrelétricas que geram menos de 1 megawatt (MW);
- **PCH - Pequena Central Hidrelétrica:** geram entre 1MW e 30MW, com área do reservatório até 13Km²;
- **UHE - Usina Hidrelétrica**, ou AHE - Aproveitamento Hidrelétrico: geram mais de 30MW e/ou reservatório com mais de 13Km².

Os limites de potência para a classificação de Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCH, ou “Small Hydropower – SHP”, variam entre os países. No Brasil, a classe da PCH deve possuir potência outorgada igual ou inferior a 30 MW e atender à seguinte inequação:

$$A \leq \frac{14,3 \times P}{H_b}$$

Onde, P = potência elétrica instalada em (MW), A = área do reservatório em (km²) e H_b = queda bruta em (m), definida pela diferença entre os níveis d'água máximos normal de montante e normal de jusante.

(ii) capacidade de regularização do reservatório: existem 3 tipos para PCH e 1 tipo para UHE:

- a **Fio d'água** (PCH);
- de **Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório** (PCH);
- de **Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório** (PCH);
- de **Acumulação, com Regularização superior a mensal do Reservatório** (UHE).

Conforme ELETROBRÁS (2000) a usina PCH a fio d'água é empregada quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista. Nesse caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água. Esse tipo de PCH apresenta, dentre outras, as seguintes simplificações:

- dispensa estudos de regularização de vazões;
- dispensa estudos de sazonalidade da carga elétrica do consumidor;
- facilita os estudos e a concepção da tomada d'água;
- as barragens serão, normalmente, baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução;

- como as áreas inundadas são pequenas, os valores despendidos com indenizações serão reduzidos.

As usinas de acumulação com regularização diária, mensal ou superior a mensal são consideradas quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor (ou mercado projetado) e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto. Os estudos de regularização e a metodologia para escolha da descarga de projeto são realizados na etapa do dimensionamento dos parâmetros físico-operativos do projeto onde são estudados aspectos de curva cota x área x volume, cota do canal de fuga x descarga (curva-chave), perdas de carga, depleções, turbinas e rendimento, custo estimado da obra, custo estimado de operação e manutenção. (ELETROBRÁS, 2000).

(iii) Sistemas de adução considerados para dois tipos de PCH:

- adução em **baixa pressão** com **escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado**;
- adução em **baixa pressão** por meio de **tubulação / alta pressão em conduto forçado**.

A escolha de um ou outro tipo dependerá das condições topográficas e geológicas que apresente o local do aproveitamento, bem como de estudo econômico comparativo. Para sistema de adução longo, quando a inclinação da encosta e as condições de fundação forem favoráveis à construção de um canal, este tipo, em princípio, deverá ser a solução mais econômica. Para sistema de adução curto, a opção por tubulação única, para os trechos de baixa e alta pressão, deve ser estudada. (ELETROBRÁS, 2000).

(iv) Potência instalada e queda de projeto: As PCH podem ser ainda classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, como mostrado na Tabela 2.1, adiante, considerando-se os dois parâmetros conjuntamente, uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada. Para as centrais com alta e média queda, onde existe um desnível natural elevado, a casa de força fica situada, normalmente, afastada da estrutura do barramento. (ELETROBRÁS, 2000).

Tabela 2.1. Classificação das PCH quanto à Potência Instalada e quanto à altura de queda de projeto.

| Classificação das Centrais | Potência – P (KW) | Queda de Projeto – Hd (m) | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|----------|
| | | Baixa | Média | Alta |
| Micro | P < 100 | Hd < 15 | 15 < Hd < 50 | Hd > 50 |
| Mini | 100 < P < 1.000 | Hd < 20 | 20 < Hd < 100 | Hd > 100 |
| Pequena | 1.000 < P < 30.000 | Hd < 25 | 25 < Hd < 130 | Hd > 130 |

Fonte: Eletrobrás (2000).

2.2 POTENCIAL HIDRELÉTRICO NO BRASIL E NO MUNDO

Em nível mundial, Punys e Pelikan (2007), apud Larentis (2009), observaram que, após um período de grande expansão no desenvolvimento hidroenergético nos anos 80, desde 1990 tem-se observado um declínio, especialmente nos 15 países da antiga União Europeia (UE), em parte devido o esgotamento dos recursos hídricos para aproveitamento hidroelétrico e opção por mudança na matriz energética. De acordo com os autores, estes países já desenvolveram a maior parte de seu potencial. Mesmo países em acelerado crescimento têm experimentado uma redução relativa de hidroeletricidade na matriz elétrica.

Há, no entanto, uma expectativa de continuado crescimento da demanda mundial por energia elétrica, particularmente em países em desenvolvimento. Obviamente, a expansão da demanda causará uma continua pressão na produção de energia elétrica. Larentis (2009) afirma que esse fato tem maior relevância quando se observa que uma importante parte do potencial mundial ainda por desenvolver está em alguns países em desenvolvimento, como China (DICKINSON *et al.*, 1982; VICTOR e HELLER, 2007), Turquia (BALLAT, 2007; OZTURK *et al.*, 2009), Índia (VICTOR e HELLER, 2007), Paquistão (MIRZA *et al.*, 2008) e Brasil (BRASIL, 2007a; BRASIL, 2007b). A Tabela 2.2 apresenta os cenários estimados de expansão de energia hidrelétrica e sua relativa importância em alguns países em desenvolvimento.

A exploração de mini a pequenas centrais hidroelétricas apresentam indicadores favoráveis à continuidade da exploração ao longo de décadas. Conforme Larentis (2009), mesmo países desenvolvidos, como os Estados Unidos (EUA) e alguns países da Europa, com potencial ainda não explorado, planejam sua matriz energética contando com novos desenvolvimentos em hidroeletricidade. Os EUA, através do Departamento de Energia (DOE), têm mantido constante esforço no levantamento de seu potencial hidráulico não desenvolvido, atualmente estimado em torno de 60 GW de capacidade (HALL *et al.*, 2006), na maioria composto por pequenas e mini centrais hidroelétricas.

Na Europa, Punys e Pelikan (2007) relatam uma forte ascensão nas últimas décadas em alguns países da nova União Europeia (UE), como a Polônia, e um crescimento constante em outros, como Eslovênia, Bulgária, Romênia e Turquia. A Associação Europeia de Pequenos Potenciais Hidráulicos (ESHA/ SERO/ IEFÉ, 2001) previu um aumento de 29% na exploração anual de pequenos potenciais hidráulicos na produção de eletricidade no curto-médio prazo (11,5 TWh na antiga UE e 13,3 TWh em outros países da Europa). Em termos de capacidade, há um total de 2210 MW em implementação em, no mínimo, 23 países europeus e 8.000 MW com possibilidade de realização no médio prazo (OZTURK *et al.*, 2009).

Tabela 2.2. Cenários de expansão do setor hidrelétrico em alguns países em desenvolvimento. Adaptado de Larentis (2009).

| País | Histórico do Crescimento (% na matriz elétrica) | Cenário Futuro (expansão estimada) |
|-----------|---|--|
| China | Crescimento constante nos últimos anos. Percentual de 25% da matriz energética de 110 GW ¹ | 80% da capacidade de energia hidroelétrica ainda remanescente ¹ . |
| Turquia | Crescimento até 1980 e declínio até 2000. Percentual de 25% da matriz energética de 12,5 GW ² | 19 GW, 80% do potencial viável ainda inexplorado ³ . |
| Índia | Declínio na década de 60 a 90 e crescimento constante desde então. Percentual de 25% da matriz energética de 29,5 GW ¹ . | 13,7 GW, 40% do potencial estimado ¹ . |
| Paquistão | Crescimento constante. Potencial explorado de 6,6 GW em 2008 ⁴ . | 32,5 GW no médio e longo prazo ⁴ |
| Brasil | Em declínio desde o fim da década de 90. Percentual de 80% da matriz energética de 75 GW ⁵ | 126 GW no longo e médio prazo ⁶ |

Fontes: 1 Victor e Heller (2007); 2 Ballat (2007); 3 Ozturk *et al.* (2009); 4 Mirza *et al.* (2008); 5 Brasil (2007a); 6 Brasil (2007b)

Diferentemente da grande maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, o Brasil tem nos rios sua principal fonte de geração de energia elétrica. Afirma-se que 75% é proveniente de hidrelétricas (EPE, 2007).

Enquanto a exploração dos potenciais hidrelétricos mais próximos aos grandes centros urbanos brasileiros parece estar se esgotando, as projeções indicam um elevado potencial para as bacias mais distantes do Sul-Sudeste, em especial os potenciais da região amazônica. Segundo Tundisi (2007), “a construção de hidrelétricas na região amazônica, especialmente nos tributários do Rio Amazonas, demandará profundas alterações no ciclo hidrológico, na biodiversidade aquática, no ciclo hidrossocial e hidroeconômico da região, exigindo estudos interdisciplinares detalhados de alto nível para resolver os problemas desses impactos e minimizá-los. É necessário, contudo, um conjunto de estudos estratégicos, ecológicos e econômicos com a finalidade de promover uma visão de Estado de longo prazo na exploração hidroenergética na Amazônia”.

As tabelas 2.3 e 2.4 mostram as maiores bacias brasileiras com seu potencial aproveitado, considerando o ano de 2006 e projeções das bacias com maior potencial.

Apesar dos estudos de inventários, projetos básicos e executivos utilizarem valores mais precisos, o **potencial estimado** é calculado a partir de dados secundários, não considerando elevações com maior acurácia, estudos geológico-geotécnicos, restrições ambientais e usos múltiplos dos recursos hídricos. Segundo Neto (2013), o potencial hidrelétrico remanescente de um rio é calculado pelo produto da queda, proporcionada pela diferença entre o nível d'água da nascente do rio e da sua foz, pela vazão disponível na foz, como se existisse uma grande barragem na foz do rio que se elevasse até a nascente.

Tabela 2.3. Geração de hidreletricidade no Brasil, por bacia hidrográfica (MMA, 2006).

| Região Hidrográfica | Inventariado (MW) | Estimado (MW) | Aproveitado (2004) |
|---------------------|-------------------|---------------|--------------------|
| Amazônica | 42.619 | 107.143 | 0,7% |
| Paraná | 52.577 | 58.097 | 70% |
| São Francisco | 24.221 | 26.285 | 44% |
| Tocantins | 23.433 | 25.320 | 41% |

Tabela 2.4. Projeção do potencial de geração dos recursos hídricos em GW. (MMA, 2006)

| Bacia | Amazonas | Araguaia-Tocantins | Demais | Total |
|------------------------------|----------|--------------------|--------|-------|
| Potencial aproveitado | 1 | 12 | 65 | 78 |
| Expansão potencial até 2015 | 12 | 2 | 6 | 20 |
| Expansão potencial após 2015 | 61 | 5 | 10 | 76 |
| Total | 74 | 19 | 81 | 174 |

Este conceito pode ser aplicado se quisermos contabilizar o potencial hidráulico total do rio, longe, porém, de representar o que poderia ser convertido em potencial hidrelétrico econômico e ambientalmente viável. Segundo Neto (2013), além do problema metodológico, do potencial estimado de 81,5 GW, cerca de 32% do total das reservas hidrelétricas, é composto por locais que encontram-se, na quase totalidade, na região amazônica, carente de dados e informações confiáveis, além de ser uma região recortada por terras indígenas, reservas biológicas e naturais. No SIPOT¹⁰ (Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro), a estimativa do potencial hidrelétrico brasileiro total cadastrado é de cerca de 258 GW, porém essa vantagem competitiva em relação à matriz energética de outros países deve ser avaliada com o devido rigor técnico, visto que a metodologia para avaliação do potencial não está claramente explicitada.

¹⁰O SIPOT tem como objetivo armazenar e processar informações sobre estudos e projetos de usinas hidrelétricas. Um dos produtos gerados pelo SIPOT é o valor correspondente ao potencial hidrelétrico brasileiro. Importante observar que esse potencial é teórico porque inclui o resultado de estudos realizados de forma expedita para a determinação do potencial de algumas bacias hidrográficas. O desenvolvimento dos estudos hidrelétricos, ou seja, o aprofundamento dos estudos em estágios de inventário, viabilidade e projeto básico, permite identificar as restrições econômicas, ambientais e técnicas existentes, que muitas vezes reduzem o potencial inicialmente estimado.

2.2.1 O planejamento do setor elétrico brasileiro

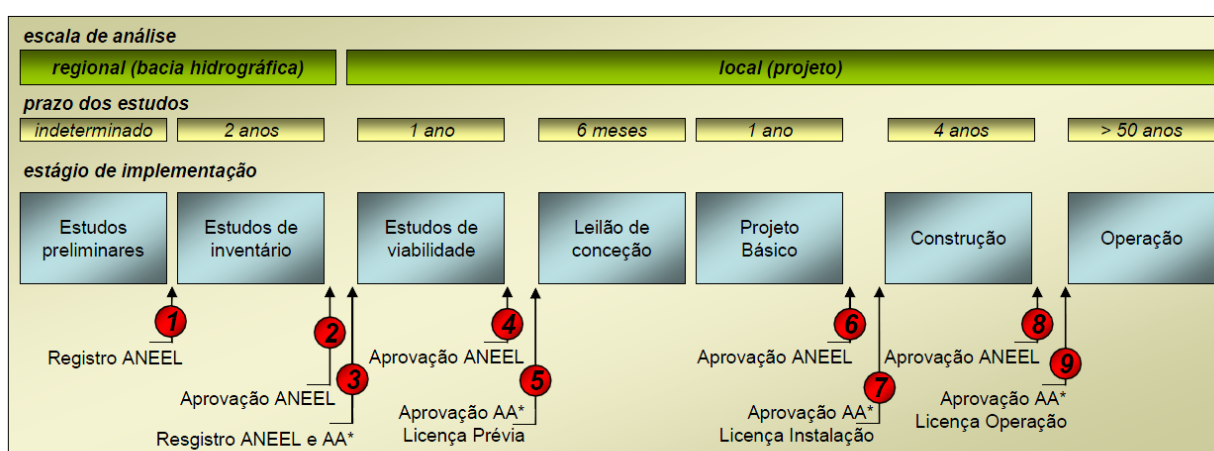
Conforme Souza (2000), antes da reestruturação do Setor Elétrico brasileiro, uma das atribuições da Eletrobrás era executar o plano de expansão do Sistema Elétrico Brasileiro, o qual atuava em três níveis: no planejamento de longo prazo, com um horizonte de 25 a 30 anos, no planejamento de médio prazo, com um horizonte de 15 anos, e no planejamento de curto prazo, conhecido como Plano Decenal de Geração, que tem um horizonte de até 10 anos. Atualmente, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Os estudos para aproveitamentos hidroelétricos são realizados em etapas sequenciadas e amparados em regulamentos e instruções normativas. As etapas de estudos e projetos para a implantação de um aproveitamento hidroelétrico, segundo MME/CEPEL (2007), conforme apresentado na Figura 2.1, são:

- **Estimativa do Potencial Hidrelétrico:** análise preliminar das características da bacia hidrográfica, quanto aos aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos e ambientais, no sentido de verificar sua vocação para geração de energia elétrica, sendo pautada exclusivamente nos dados disponíveis.
- **Estudo de Inventário Hidrelétrico:** determina o potencial hidrelétrico de uma bacia hidrográfica e estabelece a melhor divisão de queda, mediante a identificação do conjunto de aproveitamentos que propiciem um máximo de energia ao menor custo, aliado a um mínimo de efeitos relativos sobre o meio ambiente. A análise é efetuada a partir de dados secundários, complementados com informações de campo, e pautada em estudos-base, apresentando um conjunto de aproveitamentos, suas principais características, estimativas de custo, índices custos-benefícios e índices ambientais.
- **Estudo de Viabilidade:** definição da concepção global de um dado aproveitamento da melhor alternativa de divisão de queda estabelecida na etapa de inventário, visando sua otimização técnico-econômica e ambiental e a avaliação de seus benefícios e custos associados. Compreende o dimensionamento do aproveitamento, as obras de infra-estrutura local e regional necessárias à sua implantação, o seu reservatório e respectiva área de influência, os outros usos da água e as ações ambientais correspondentes. O **Relatório Final do Estudo de Viabilidade**, de acordo com a Lei 9074 de 07 de julho de 1995 (parágrafo 3º do inciso III do Artigo 5º) poderá constituir a base técnica para a licitação da concessão de projetos de geração de energia hidrelétrica.
- **Projeto Básico:** o aproveitamento é detalhado e definido seu orçamento com maior precisão, de forma a permitir ao vencedor da licitação de concessão a implantação do empreendimento. Nessa etapa realiza-se, também, o **Projeto Básico Ambiental**.

• **Projeto Executivo:** É a etapa em que se processa a elaboração dos desenhos de detalhamento das obras civis e dos equipamentos hidromecânicos e eletromecânicos, necessários à execução da obra e à montagem dos equipamentos. Nesta etapa são tomadas todas as medidas pertinentes à implantação do reservatório.

Portanto, segundo MME/CEPEL (2007), pode-se dizer que os Estudos para implantação de um aproveitamento hidroelétrico se iniciam com a **Estimativa do Potencial Hidroelétrico**. É nesta etapa que se procede à análise preliminar das características da bacia hidrográfica, especialmente quanto aos aspectos topográficos, hidrológicos e geológicos, no sentido de verificar sua vocação para geração de energia elétrica. Essa análise, exclusivamente pautada nos dados disponíveis, é feita em escritório e permite a primeira avaliação do potencial, estimativa preliminar de custo do aproveitamento da bacia hidrográfica e a definição de prioridade para a etapa seguinte.



* AA: Agência Ambiental (Estadual ou Federal)

Figura 2.1: Etapas de implantação dos aproveitamentos hidroelétricos. Fonte: Larentis (2009), adaptado de MME/CEPEL (2007).

2.2.2 Perspectivas da Matriz Elétrica Brasileira

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE disponibilizou o Relatório Final do Balanço Energético Nacional – BEN¹¹, Edição 2013, que apresenta em detalhes a contabilização da oferta, transformação e consumo final de produtos energéticos no Brasil, tendo por base o ano de 2012. No documento, os dados são apresentados em tabelas com os últimos 10 anos.

Em 2012, a oferta interna de energia (total de energia demandada no país) aumentou 11,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), anotando uma taxa de crescimento de 4,1% e atingindo 283,6 Mtep. Gás natural, petróleo e derivados responderam por 97% deste incremento, basicamente em função da redução na oferta interna de biomassa da cana - notadamente do etanol - e de hidreletricidade.

¹¹ Relatório Final do Balanço Energético Nacional – BEN¹¹, Edição 2013. <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Balan%C3%A7o%20Energ%C3%A9tico%20Nacional%20E2%80%93%20BEN/EPEdisponibilizaoRelat%C3%B3rioFinaldoBalan%C3%A7oEnerg%C3%A9ticoNacional%E2%80%93BEN2013.aspx>

O Relatório Síntese do BEN 2013 informa que houve uma redução da proporção de renováveis na matriz energética brasileira. Essa participação, contudo, manteve-se no patamar de 42,4%, significativamente acima da média mundial de 13,2%, calculada pela Agência Internacional de Energia. Em 2012, o total de emissões associadas à matriz energética atingiu 429 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂-eq) - quase metade gerada no setor de transportes.

No setor de energia elétrica, apesar do aumento de 1.835 megawatts (MW) na potência instalada do parque hidrelétrico, a oferta de energia hidráulica reduziu-se em 1,9% devido às condições hidrológicas, especialmente na segunda metade do ano passado. A menor oferta hídrica explica o recuo da participação de renováveis na matriz elétrica, de 88,9% em 2011 para 84,5% em 2012. A potência eólica atingiu 1.894 MW, praticamente dobrando a fatia desta fonte na matriz elétrica nacional.

Em artigo publicado sobre perspectivas da matriz elétrica, Castro *et al.* (2008) afirmam que a matriz elétrica brasileira¹² possui uma composição ímpar em relação ao resto do mundo com participação de geração hidroelétrica na ordem de 90%. Esta participação é muito expressiva para um mercado com a dimensão e escala do brasileiro. Esta matriz tem como base a existência de centrais hidroelétricas com grandes reservatórios que estocam água no período úmido do ano, permitindo a sua conversão em energia elétrica no período seco do ano. São estes reservatórios que possibilitam uma oferta regular de energia elétrica ao longo de todo ano mesmo com um regime hidrológico irregular.

Conforme os autores, embora ainda existam mais de 150 GW de recursos hídricos a ser explorada, a maior parte deste potencial se localiza na Região Norte do país que é geograficamente plana. Esta característica física irá limitar a construção de grandes reservatórios, ocasionando uma crescente redução da capacidade de regularização da oferta de energia elétrica. Esta redução da capacidade de regularização da oferta de energia associada à demanda crescente por energia elétrica torna necessária a diversificação da matriz energética brasileira com a inserção de outras fontes, especialmente aptas para operarem na base do sistema no período seco do ano (CASTRO *et al.*, 2010). Uma das questões cruciais para o planejamento do setor elétrico brasileiro é determinar uma política energética de complementariedade à fonte hídrica, convergente com a política global de redução do efeito estufa.

O Plano Decenal 2008-2017 elaborado pela EPE aponta para uma tendência de transição da matriz elétrica brasileira de uma estrutura hídrica para uma composição hidrotérmica. O plano indica que as fontes fósseis de energia têm previsão de aumento de participação na oferta brasileira de energia elétrica de 11% em 2008 para 17% em 2017. As estimativas para 2017 devem-se ao aumento de empreendimentos termoelétricos movidos a combustíveis fósseis, resultantes dos últimos leilões de energia nova para entrega de energia elétrica em 3 e 5 anos (A-3 e A-5) realizados nos

¹² O Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro e o Contexto Mundial de Mudanças Climáticas, Nivalde José de Castro e Guilherme de A. Dantas. Acessado em 6/8/2013 <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/artigos/100525planejamentobrasil.pdf>

anos de 2007 e 2008. Contudo esta direção de transição da matriz vai contra a política ambiental. Os resultados desses leilões são incompatíveis com a racionalidade e potencial de expansão do setor elétrico brasileiro, considerando além do potencial hidroelétrico, a bioeletricidade e energia eólica. Estas duas fontes renováveis apresentam possibilidades concretas de ampliação da participação na matriz.

Mesmo com esta possível ampliação da inserção de empreendimentos térmicos no parque brasileiro e o conseqüente aumento da geração termoelétrica na oferta brasileira de energia elétrica, a participação das fontes renováveis de energia na oferta brasileira permanecerá significativamente acima da média verificada nos países desenvolvidos com a implementação de metas ambiciosas de promoção de fontes renováveis de energia, como é o caso da União Européia. Entretanto, mesmo com o atual *status* do Brasil no campo da energia elétrica, não seria prudente aceitar o cenário que se configurou com os últimos leilões de energia nova, com a contratação maciça de usinas termoelétricas movidas a recursos fósseis. Há a necessidade de serem promovidos ajustes com o intuito de manter e até mesmo acentuar o caráter limpo da matriz brasileira. Esta para ser uma das formas estratégicas para se estabelecer efetivamente uma economia verde.

A Tabela 2.5 ilustra o impacto negativo da inserção de térmicas a óleo em relação às emissões de gases do efeito estufa caso se concretize as estimativas do Plano Decenal 2008-2017 .

Tabela 2.5. Emissões de CO₂ de diferentes fontes de geração (em Kg por MWh).

| Fonte de Energia | Emissão de CO ₂ |
|-----------------------------|----------------------------|
| Gás Natural (ciclo aberto) | 440 |
| Gás Natural (ciclo fechado) | 400 |
| Óleo | 550 |
| Carvão | 800 |
| Hidroeletricidade | 25 |
| Energia Eólica | 28 |

Fonte: União Europeia (2006).

A argumentação de especialistas, citada em Dutra (2007), Castro *et al.* (2008) e Castro *et al.* (2010), é que o Brasil deve encarar a promoção de fontes renováveis de energia, especialmente no setor elétrico, como uma oportunidade porque esta promoção é condizente com o objetivo de se estabelecer a economia verde. O Brasil possui condições excepcionais para realizar esta transição com custos inferiores aos de outros países. No setor elétrico, o potencial de geração de bioeletricidade e de energia eólica permite que se vislumbre a manutenção do caráter sustentável da matriz brasileira sem que se crie atrito com os custos de geração desde que haja uma política consistente de inserção destas fontes na oferta brasileira de energia elétrica.

As melhores escolhas políticas para o setor devem ser realizadas com a intenção de aproveitar o máximo potencial com a mínima fragilidade. Não se pode negar que há

conflitos para compreensão do problema para as perspectivas da matriz energética brasileira. Verifica-se que as dificuldades encontradas em procedimentos para exploração sustentável dos potenciais hidroelétricos devem ser mitigadas pela melhoria e agilidade nos procedimentos em cada uma das entidades conforme as competências conferidas. Incertezas (informações inadequadas ou ausência de informações) geram conflitos e demora nas tomadas de decisões. As fragilidades ambientais devem ser tratadas desde as primeiras fases das decisões para expansão do setor hidroelétrico. As informações mais adequadas possíveis sobre as variáveis técnicas, ambientais, socioeconômicas relevantes, nas fases iniciais, são necessárias a todos os intervenientes, de forma a evitar conflitos posteriores decorrentes de assimetrias de informações. O **Manual de Inventário de 2007**¹³ trouxe instruções para estudos de viabilidade de aproveitamentos hidroelétricos e “o conceito de avaliação ambiental integrada, mas precisa ser regulamentada, definindo em que ponto ela deve atuar e como deve ser feita” (SANTOS, 2011). O manual traz uma série de diretrizes “técnicas” para estudos e projetos de pequenas centrais hidroelétricas, porém, faltam conceitos e aplicações para organizar as informações em uma base unificada de dados e aproveitar essas diretrizes para processos de tomadas de decisões. As ferramentas e técnicas para aperfeiçoamento do tratamento de informação e as melhores práticas em gerenciamento de projetos podem contribuir para avaliações integradas.

Diante da quantidade de visões, conceitos, restrições e regulamentos legais para estudos de potenciais hidroelétricos inseridos na matriz elétrica brasileira, essa pesquisa procura fazer abstrações ao reter as informações mais enxutas e simplificadas das variáveis relevantes e suas propriedades, de forma a possibilitar aplicabilidades comuns às avaliações de potenciais hidroelétricos na fase de prospecção. Para facilitar abstrações do mundo real quando o objetivo é a avaliação de potenciais hidroelétricos, foram feitos levantamentos dos arcabouços (“*Framework*”) apresentados pelas pesquisas em nível mundial.

2.3 *FRAMEWORK*

Segundo Fayad *et al.* (1999), “*Framework* é um conjunto de classes que colaboram para realizar uma responsabilidade para um domínio de um subsistema da aplicação”. Nesse caso o objetivo da apresentação por “*Framework*” é capturar as funcionalidades comuns a várias aplicações na área de avaliação de potenciais hidroelétricos.

As apresentações a seguir buscam fazer um levantamento do “conhecimento explícito” sobre as melhores práticas em avaliação de potenciais hidroelétricos apresentados em forma de “*Framework*” na literatura recente. Entende-se como “conhecimento explícito” aquele que pode ser facilmente codificado, podendo ser representado, armazenado, compartilhado e efetivamente aplicado (TAKEUCHI e NONAKA, 2008). A seguir são observados tópicos relevantes sobre as pesquisas dos autores.

¹³ Disponível em <http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>. Acessado em 1/11/2013.

Framework 1: Estudo Analítico de Potencial Hidroelétrico proposto por Rojanamon (2009).

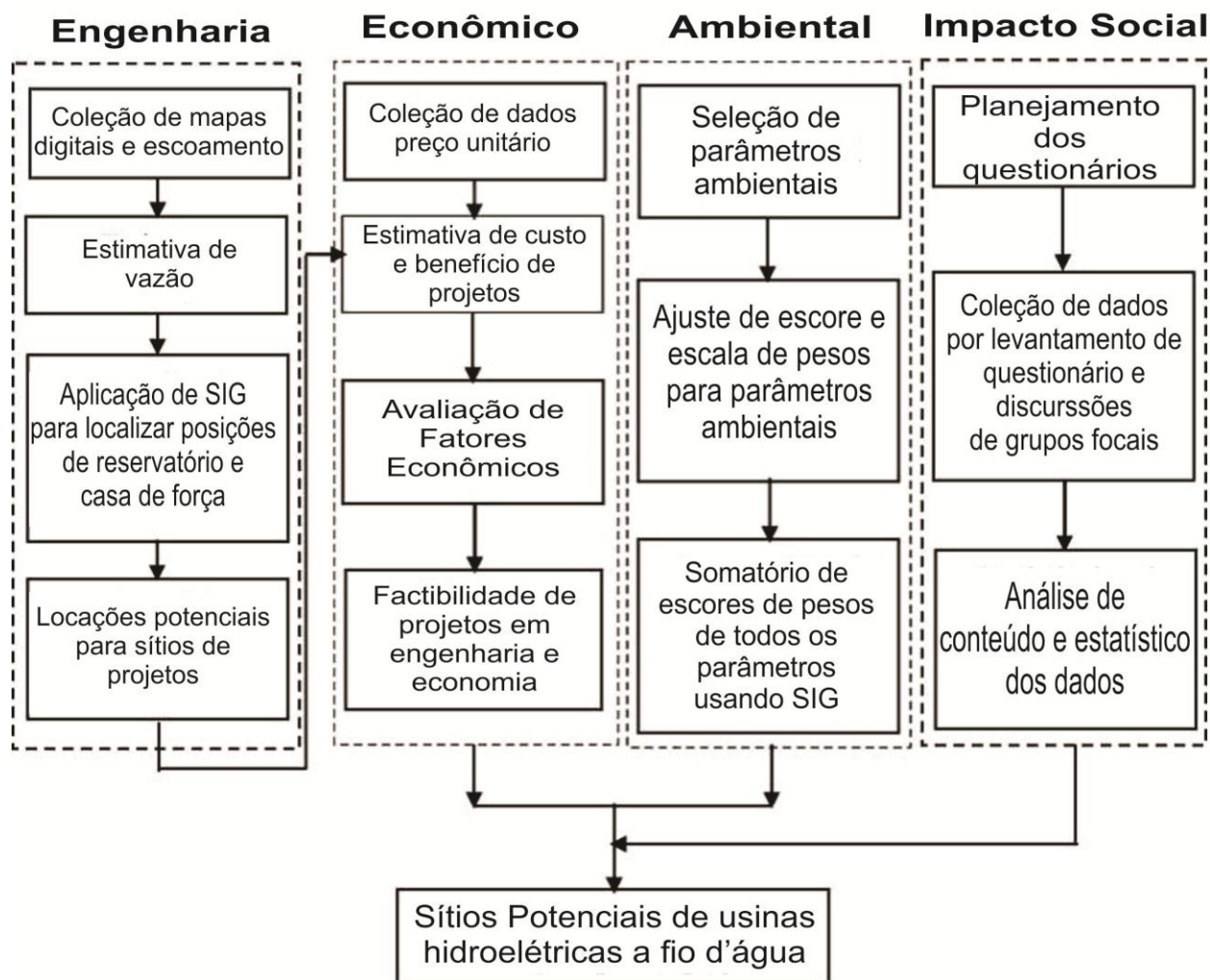


Figura 2.2. Framework para estudo analítico de potencial hidroelétrico. Fonte: Rojanamon (2009).

O estudo de caso abrangeu uma área de 13,026 km² ocupada pela bacia do rio Nan, ao norte da Tailândia, onde existem áreas montanhosas nas nascentes e o reservatório de Sirikit a montante da cidade de Nan (Província de Nan City).

O autor definiu quatro fatores chaves para localização de sítios potenciais de PCH a fio d'água: Engenharia, Econômico, Ambiental, Impacto Social. As áreas de estudo foram regiões rurais e montanhosas da Tailândia com poucas informações ambientais e dos recursos hídricos. Foi utilizada **análise ponderada de critérios** para priorização dos potenciais hidroelétricos, conforme Figura 2.2.

O fator Engenharia compreende a topografia (quedas brutas) e a hidrologia (vazão média mensal e curva de permanência). As informações hidrológicas foram obtidas por meio de técnicas estatísticas para regionalização descritas em Rojanamon (2007). Em função da altura de queda, obtida por meio de um MDE em SIG (ESRI, 2002) e vazões regionalizadas, foi estimada a energia gerada conforme metodologia recomendada pela Fundação para Energias Renováveis (New Energy Foundation – NEF) de Tokyo, Japão. (NEW ENERGY FOUNDATION, 1996).

O Fator Econômico relacionou custos de investimento, operação e manutenção, separados por custos diretos e indiretos. As estimativas de custos diretos seguiram recomendações do Department of Alternative Energy Development and Efficiency - DEDE (2004), Department of Energy Development and Promotion – DEDP, Electricity Generating Authority of Thailand – EGAT (2007) e New Energy Foundation - NEF (1996). As estimativas prévias são obtidas por fórmulas empíricas, custos unitários de preços de mercado e métodos paramétricos para rápida aproximação. Os custos de projetos e planejamento correspondem a 5% dos custos de obras civis (NEW ENERGY FOUNDATION, 1996). Os custos estimados para mitigação ambiental constituem em 7% do total dos custos de obras civis EGAT (Electricity Generating Authority of Thailand, 2007). As metodologias econômico-financeiras utilizadas são: Valor Presente Líquido – VPL, Taxa Interna de Retorno – TIR e Análise Benefício Custo – B/C. Os projetos são considerados economicamente viáveis quando $VPL > 0$, $B/C > 1$ e $TIR \geq 8\%$. As obras civis têm tempo estimado de 3 anos e o tempo de vida econômica do projeto é de 50 anos¹⁴.

No Fator Ambiental para estudos de usinas a fio d'água são considerados parâmetros ambientais adotando critérios e pesos. Os seis parâmetros utilizados são: classe da área da bacia hidrográfica, localização do parque nacional e santuário da vida selvagem, tipo de uso do solo, densidade de população, desempenho da média anual de transporte de sedimento e heranças do local. Os escores e escala de pesos dos parâmetros são os mesmos adotados por Chaisomphpb e Tanutpongpalin (2004).

Os impactos sociais considerados no estudo foram condições socioeconômicas, uso da floresta e qualidade de vida, condições de mudança dos habitantes e das comunidades, percepção da usina a fio d'água para a comunidade, atitude para o projeto e apoio ao projeto. Os dados são coletados por respostas a questionários e processos de participação pública.

O trabalho concluiu que as pessoas responderam positivamente para o desenvolvimento de projetos de pequenas centrais hidroelétricas a fio d'água nas suas comunidades, caso elas possam obter informações sobre os projetos e elas tenham oportunidades de propor ideias e sugestões nos estágios mais iniciais do desenvolvimento do planejamento (prospecção) por meio do foco em grupos de discussão. Não obstante, os investidores de projetos, o Governo e as comunidades locais, deveriam buscar acalmar as preocupações das pessoas antes de iniciar o projeto. Afirma ainda o autor, que a avaliação tradicional baseada em critérios de engenharia e econômico, pode ser avaliada de forma integrada com fatores ambientais e sociais na fase de estudos preliminares. Rojanamon (2009) indica que existe potencial de aplicação mais amplo e que pode ser aplicado a outras fontes de potenciais hidroelétricos. O método oferece uma rápida forma de examinar áreas maiores e focadas na possibilidade de identificação de sítios potenciais por meio de um ranking baseados em critérios. Conclui que o tomador de decisão pode utilizar os resultados do presente estudo para investigar a comparar a possibilidade de vários outros sítios de projetos.

¹⁴ http://www.eng.uerj.br/~luciene/hidraulica_aplicada/usinas_hidreletricas.pdf

Framework 2: Análise sequências sob critérios de restrição e locação baseado em ponderação por peso Yi et al. (2010)



Figura 2.3. Framework para análise de localização de sítio para pequena usina hidroelétrica utilizando sistema de informação geoespacial. Fonte: Yi et al. (2010).

Yi et al. (2010) apresentam Framework baseado em desenvolvimento de uma série de “scripts” desenvolvidos em “avenue”¹⁵ para plataforma ArcView da ESRI (Figura 2.1). Os estudos são realizados para uma bacia hidrográfica de aproximadamente 550 Km² em área rural no sudoeste da Coreia do Sul com potenciais para PCH. Os autores afirmam que o sucesso da estimativa de pequenos potenciais baseia-se na consideração da eficiência econômica, determinada pelo desempenho da geração conforme a potência instalada e o tipo de usina. Considera-se que os sistemas de informação geoespacial recentemente têm sido usados para análise da localização de sítios com potenciais hidroelétricos implicando em análises mais precisas no início dos planejamentos de PCH, conforme estudos de Gismalla e Bruen (2006) e outros.

No estudo as análises são realizadas sequencialmente sob critérios de restrição e locação. Os critérios de restrição eliminam as áreas indisponíveis para investigação de potenciais em termos de fatores econômicos e técnicos, utilizando mapas nacionais de uso e ocupação do solo, agricultura, parques nacionais, áreas para suprimento de água. Os critérios de locação são fatores topográficos (quedas naturais e limites de capacidade de armazenamento do reservatório), fatores hidrológicos (escoamento da área de contribuição) e fatores ecológicos e ambientais (avaliação do mapa ambiental nacional). Para cada fator é determinado **um escore e um peso**, e depois ponderado um escore final. As escolhas finais das localizações não são em função da prioridade

¹⁵ Avenue é uma linguagem orientada a objetos usada para customizar e desenvolver aplicações no ArcView desenvolvida pela ESRI até as versões ArcView 3.x.

do total dos escores, mas também pela análise das proximidades dos pontos escolhidos em função de erros de acurácia dos dados do SIG e das dificuldades construtivas. Os autores afirmam que os propósitos funcionais do modelo são obter antecipadamente conhecimento sobre o potencial e verificar quais os reais fenômenos que necessitam ser explicados pelo modelo.

Framework 3: Modelo Determinístico por processo de otimização Larentis et al. (2010).

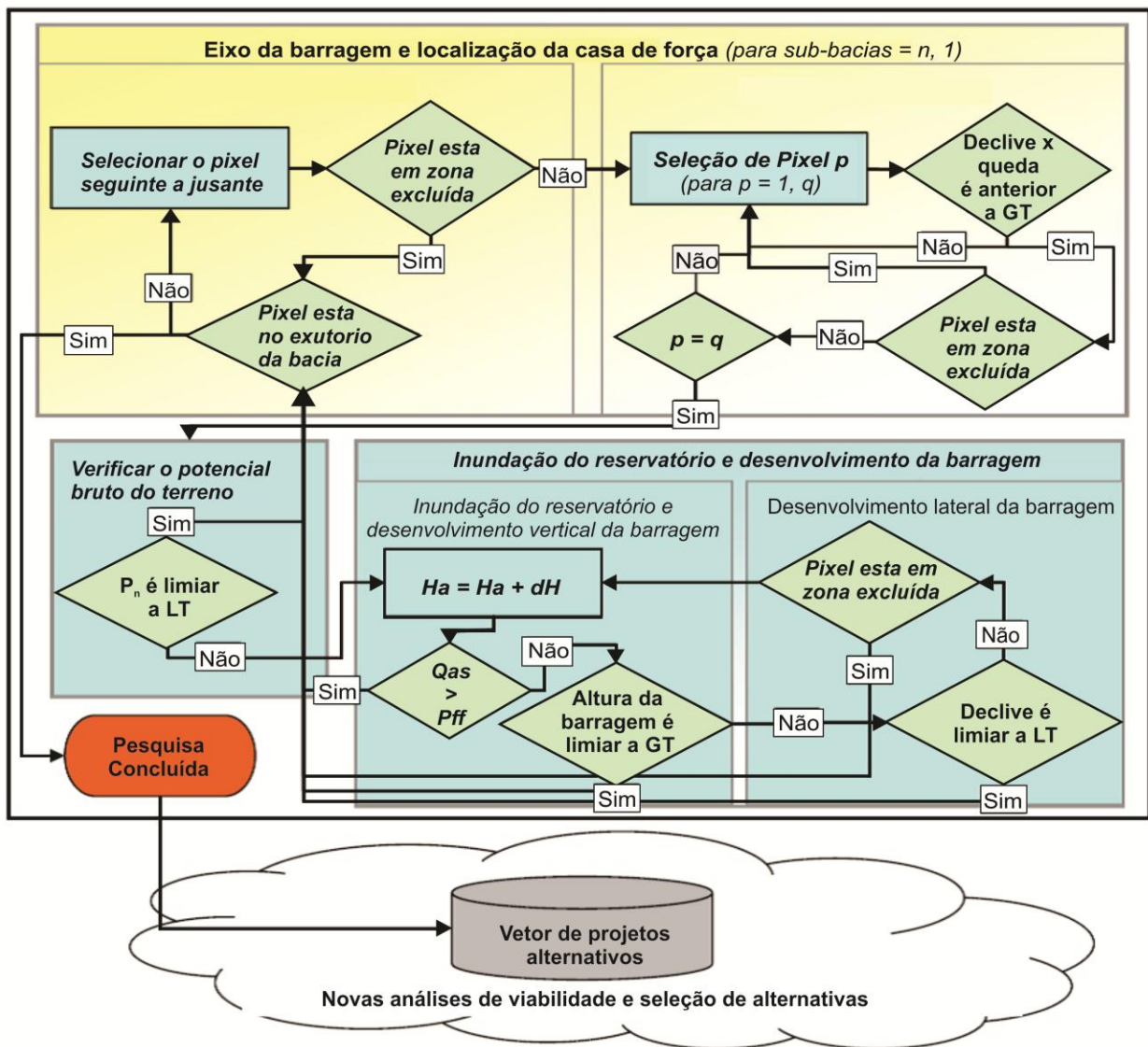


Figura 2.4. Esquema de procedimentos e critérios no levantamento do potencial hidroelétrico. Fonte: Larentis et al. (2010).

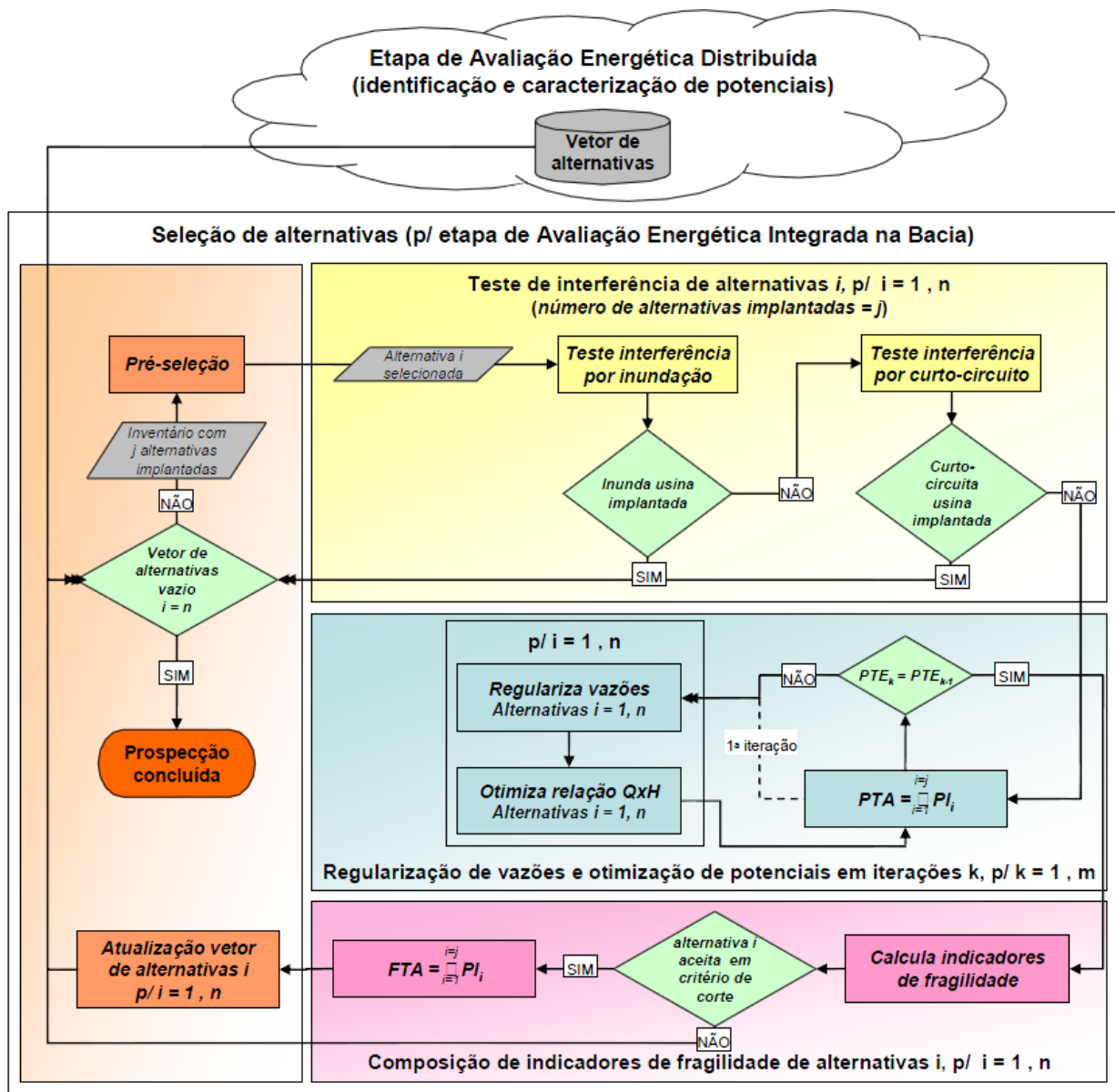


Figura 2.5. Esquema de procedimentos e critérios na seleção do potencial hidroelétrico. Fonte: Larentis *et al* (2009).

Larentis *et al.* (2010) desenvolveram o aplicativo em linguagem FORTRAN por processo de otimização por procedimentos sequenciais em duas etapas: a primeira realiza de forma automatizada o levantamento de potenciais hidroelétricos e a segunda seleciona os potenciais por critérios de maiores potenciais na bacia hidrográfica de forma iterativa (sequência de ciclos de decisão), com síntese apresentada nas figuras 2.4 e 2.5.

Na pré-seleção o algoritmo checka no MDE o potencial bruto, por meio de vazão e altura, verificando a possibilidade geração hidroelétrica por acumulação ou por derivação (a fio d'água). As vazões regularizadas são calculadas em função da disposição do cenário dos reservatórios na bacia hidrográfica. O processo de otimização é obtido pela melhor relação entre a vazão regularizada no reservatório e a altura bruta. O processo realiza iterações até que seja selecionado o cenário com o maior somatório de potências brutas alcançado na bacia hidrográfica.

O algoritmo pode ser aplicado a outras áreas do território nacional. Foi utilizado o MDE SRTM. O autor apresenta algumas restrições do modelo no que se refere a avaliação de outras considerações ambientais ou socioeconômicas não contempladas no algoritmo.

Framework 4: Sensoriamento Remoto aplicado ao Potencial Hidroenergético. Dudhani et al. (2006).

O *Framework* apresentado por Dudhani et al. (2006) tem estrutura de apresentação baseada na estimativa da energia necessária e na disponibilidade de recursos naturais de quedas d'água e vazões (Figura 2.6). Foram usadas técnicas de sensoriamento remoto para identificações de feições geográficas com favorabilidade aos potenciais hidroelétricos. Os autores enfatizam a importância da existência das linhas de distribuições de energia elétrica e mitigação de perdas técnicas e ganho de eficiência energética para a redução dos custos de implantação e operação.

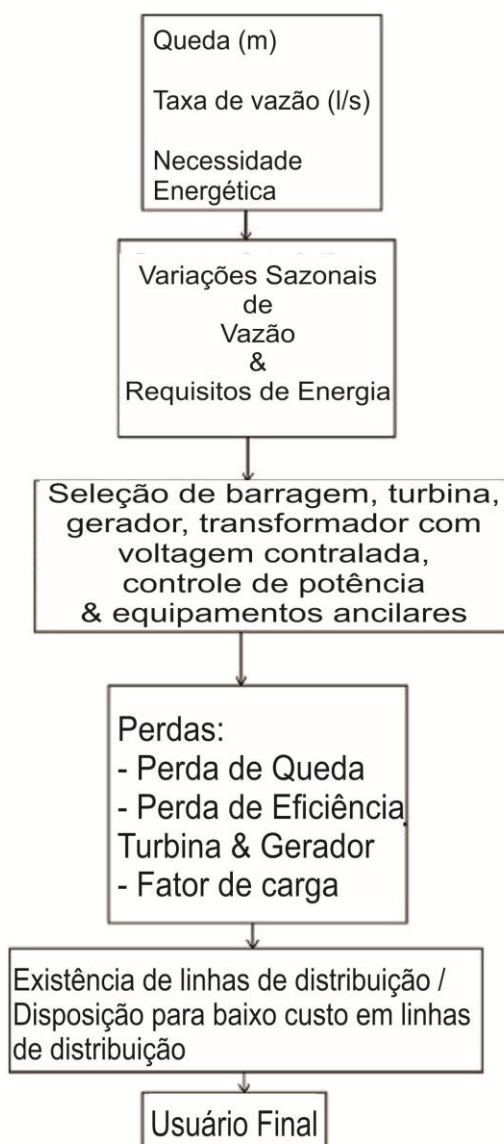


Figura 2.6. Avaliação de potencial de PCH utilizando Sensoriamento Remoto para desenvolvimento sustentável na Índia. Fonte: Dudhani et al. (2006).

Framework 5: vulnerabilidade do potencial de energia na Bacia do Prata. Cuya et al. (2013).

A proposta de Cuya *et al.* (2013) faz duas linhas de abordagens para o estudo de vulnerabilidade do potencial de energia na Bacia do Prata: a primeira baseia-se no desenvolvimento econômico, crescimento populacional e sistema hidroelétrico corrente, para estimativa da demanda necessária e da reserva de potência (Linha I); a segunda abordagem considera os estudos hidrológicos e fisiográficos para a estimativa de um mapa de potencial máximo disponível (Linha II), considerando somente a hidrologia e a fisiografia (Figura 2.7). As estimativas da demanda de energia elétrica necessária para um determinado horizonte, integrada aos estudos da potencia residual das hidroelétricas e da potência máxima disponível e não explorada das hidroelétricas, indicam uma vulnerabilidade ao potencial de energia de uma região.

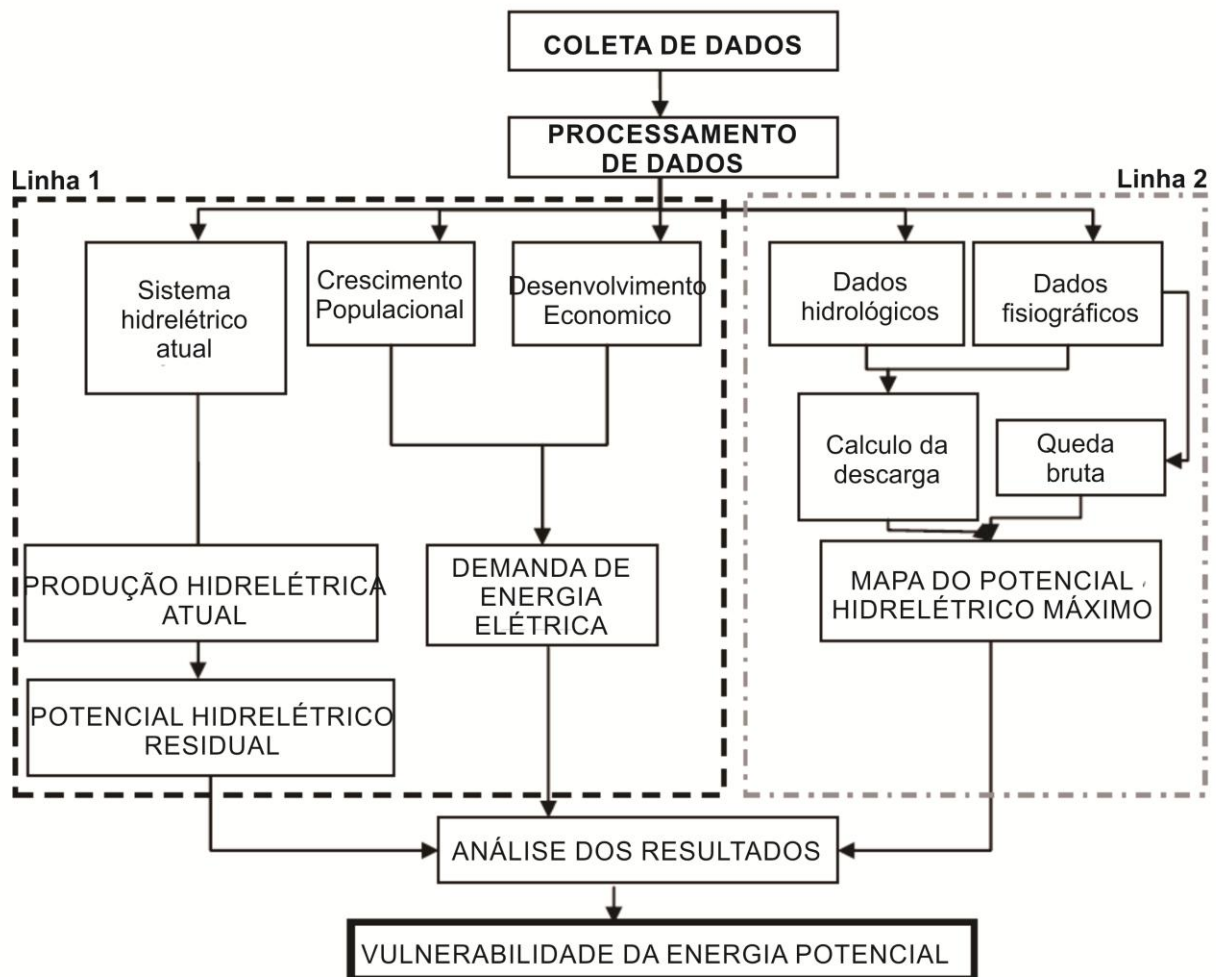


Figura 2.7. Framework da estrutura de avaliação de máximos potenciais na Bacia do Prata diante de mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Fonte: Cuya *et al.* (2013).

Framework 6: Produto dos mapas matriciais das quedas e da vazão média. Punys et al. (2011).

PUNYS et al. (2011) revisaram o estado da arte em tecnologias e aplicativos para planejamento e desenvolvimento de pequenas usinas hidroelétricas no mundo. O *Framework* proposto foca nos resultados sobre estimativa da potência bruta e da energia gerada. Os autores propuseram um *Framework* simplificado (Figura 2.8) baseado nas melhores ferramentas e técnicas que integrassem equipamentos (hardware), sistemas de informações (software) e dados.

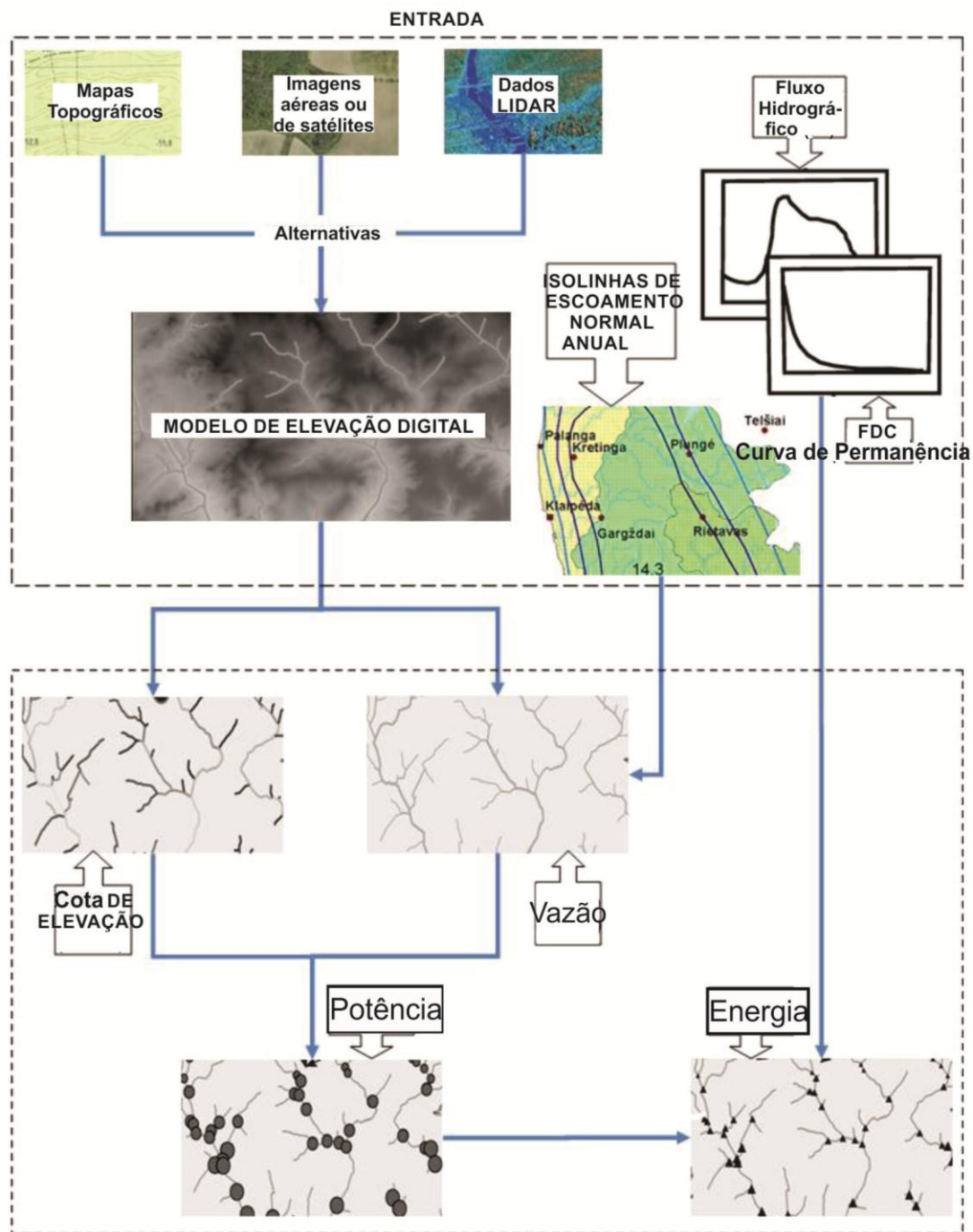


Figure 2.8. Framework das avaliações de ferramentas e técnicas para avaliação de potencial hidroelétrico. Fonte: Punys et al. (2011).

Os autores propõem a utilização de SIG para integração dos dados e utilização de sistemas especialistas em hidrologia para cálculo de curvas de permanência, hidrogramas e mapa de vazão específica em forma vetorial de isolinhas (Normal Annual Runoff Isolines – IN), conforme apresentado no *Framework*. Afirmam Punys *et al.* (2011) que as pesquisas mundiais adotam vários tipos de MDE com fontes e resoluções diferentes (ex. mapas topográficos, imagens aéreas ou de satélites e LIDAR). As facilidades para aquisição de dados têm aumentado ao longo das décadas. Conforme os estudos, os países mais desenvolvidos mantêm suas bases de dados topográficos sem a necessidade de geração de MDE para cada estudo. Esses MDEs possuem continuidade em todo o território e resoluções elevadas (ex. Escócia 10mx10m; USA 30mx30m; Noruega 25mx25m). Afirmam que o advento das técnicas de sensoriamento remoto, as ferramentas SIG para integração dos dados e a penetração dos SIGs na WEB possibilitaram um “largo passo para avaliação de Pequenas Centrais Hidroelétricas - PCH”. Conforme os autores, muitos países tem também gerado seus bancos de dados geograficos associados aos SIG com informações topográficas, hidrológicas, uso e ocupação dos solos, áreas de proteção e outras áreas.

Conforme Punys *et al.* (2011) “os desenvolvedores de aplicativos para pesquisas hidro energéticas normalmente não desenvolvem eles mesmos ferramentas para SIG, pois preferem utilizar ferramentas padrões ou aquelas criadas por outros”. Citam o exemplo da ferramenta “StreamStats¹⁶” do USGS para regionalizar dados de vazão em rios sem estações hidrométricas em qualquer trecho de rio dos Estados Unidos da América.

Conforme proposta de Punys *et al.* (2011) apresentada no *Framework* (Figura 2.8), a estimativa da potência é realizada por meio do produto da queda de elevação obtida do MDE pela vazão média. Esta é obtida da vazão específica disponibilizada em vetores de curvas de isolinhas. As isolinhas podem ser interpoladas em um SIG para geração de mapas matriciais nacionais. Conforme os autores o produto dos mapas matriciais das quedas e da vazão média permite a estimativa de mapas de sítios de potenciais hidroelétricos em escalas nacionais. Para obtenção dos valores de energia é necessário o conhecimento da potência bruta, das informações dos hidrogramas (vazões no tempo) e das curvas de permanência no sítio estudado.

Conforme Punys *et al.* (2001) há diversidade entre os países na formas de abordar os mesmos objetivos de avaliações de potenciais, em função da qualidade da informação disponível e dos recursos tecnológicos. Porém, verifica-se uma tendência de aplicar técnicas de tratamento da informação espacial (modelos digitais de elevação, informações hidrológicas distribuídas) organizadas em extensas bases de dados e desenvolver ferramentas abertas em SIG para localização e potenciais hidroelétricos. Afirmam os autores que a experiência de países (Canadá, Itália, Noruega, Escócia e Estados Unidos da América) pode ser aplicada em outras partes do mundo para destravar potenciais hidroelétricos.

¹⁶ United States Geological Survey. Sistema hidrológico STREAMSTATS. Disponível em: <http://water.usgs.gov/osw/streamstats>, acessado em 18/8/2013.

2.4 APLICAÇÕES DE GEOTECNOLOGIAS AOS POTENCIAIS HIDROELÉTRICOS

Os mais recentes critérios e metodologias aplicados ao estudo de potencial bruto de energia hidroelétrica, em escala de bacia hidrográfica, no estágio de prospecção, levam em consideração conceitos básicos de fatores topográficos e hidrológicos que são associados aos fatores sociais, econômicos e ambientais.

Como pode ser observado, verifica-se a tendência das pesquisas sobre potenciais hidroelétricos aplicarem geoprocessamento (cartografia digital, sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas - DUDHANI *et al.*, 2006; ROJANAMON *et al.*, 2009; LARENTIS, 2009; YI, 2010; KURSE *et al.*, 2010; FARIA, 2011 e LIMA *et al.*, 2012).

Conforme FARIA (2011) “a partir do desenvolvimento e da difusão das ferramentas de geoprocessamento e dos modelos digitais de terreno, algumas metodologias de pré- viabilidades de usinas hidrelétricas e de planejamento energético foram desenvolvidas com base nestes dois pilares, como apresentado nos *Frameworks*. A utilização de tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permite introduzir informações e conhecimentos de diversas fontes em um mesmo ambiente, favorecendo o processo de auxílio à tomada de decisão e de manipulação de dados”. Nestas ferramentas, toda a informação é armazenada em banco de dados georreferenciados e separada através de camadas temáticas (LO e YEUNG, 2002), o que contribui muito para a análise de empreendimentos com perfil multidisciplinar.

Independente da metodologia adotada, “para definir o impacto de qualquer empreendimento sobre um ambiente, precisamos conhecer suficientemente tanto a ação impactante como o meio que a receberá. Isso implica obter dados, elaborá-los, proceder às análises e saber interpretar os resultados” (MÜLLER, 1995).

A obtenção de dados do meio ambiente deveu-se em grande parte devido os avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto. Os modelos digitais obtidos de sensores imageadores e de radar, e a facilidade de armazenamento e processamento em plataformas SIG (Sistema de Informações Geográficas), têm permitido o desenvolvimento de uma série de metodologias para extração de características do terreno a partir de Modelos Digitais de Elevação - MDE e Modelo Digital de Terreno - MDT. As pesquisas com modelos digitais de elevação ou de terreno possibilitaram avanços na determinação de redes de drenagem, identificação da fisiografia de bacias hidrográficas, extração de parâmetros hidrológicos e geração de mapas de inundação. Citam-se estudos de O'Donnell *et al.*(1999), Olivera e Maidment (1999), Maidment e Djokic (2000), Wang *et al.* (2000), Olivera *et al.* (2002), Maidment (2002), Tate *et al.* (2002), Melo (2003), Reed (2003), Paz *et al.*(2008), Maidment (2008) e Siler (2011).

A ciência da geomorfologia sofreu forte impacto com a aplicação das geotecnologias. As abordagens para estudar as formas de relevo, sua gênese, composição (materiais) e os processos que nelas atuam foram aperfeiçoadas. A análise do relevo pode ser observada por outras ciências da Terra para definições mais acuradas da fragilidade/vulnerabilidade do meio ambiente e no estabelecimento de legislação para

sua ocupação e proteção. A morfometria refere-se aos aspectos quantitativos do relevo, como medidas de altura, comprimento, largura, superfície, volume, altura absoluta e relativa, inclinação (declividade), curvatura, orientação, densidade e frequência de suas formas. Essas variáveis obtidas da geomorfologia apoiam os estudos geológicos, geotécnicos, hidrológicos, fatores de influência sobre os estudos de potenciais hidroelétricos.

Conforme Novo (2008), a aplicação da geomorfologia fluvial procura estabelecer relações entre os processos de erosão e deposição resultantes do escoamento da água em canais fluviais e as formas de relevo dele derivadas. A forma e o padrão dos canais fluviais estão, em geral, ajustados: a) à hidrologia da bacia de drenagem, que controla a vazão sólida e líquida que escoam em um dado segmento de rio; b) à geologia da bacia (litologia e arcabouço estrutural). Os rios são poderosos agentes geomorfológicos capazes de erodir, transportar e depositar sedimentos que influenciarão decisivamente no ciclo de vida do aproveitamento hidroelétrico até o baixo desempenho energético do reservatório. Pesquisas sobre a obtenção, análise e tratamento de informações básicas e derivadas sobre geomorfologia e geomorfologia fluvial podem ser encontradas em Horton (1945), Strahler (1952), Christoletti (1981), Novo (1992), Silveira (1993), Alsdorf *et al.* (2001), Birkett (2002), Valeriano (2004), Alsdorf e Rodriguez (2005) e Valeriano *et al.* (2005).

Conforme Larentis (2009), as pesquisas em ferramentas computacionais têm sido usadas no auxílio à localização de potenciais hidrelétricos de uma forma rápida e com uma confiabilidade suficiente para estudos preliminares, como em Ávila *et al.* (2003) e Hall *et al.* (2004). Larentis (2009) utilizou satisfatoriamente o algoritmo “Hydrospot” de prospecção para levantamento de áreas de potenciais, porém o autor verifica que a abordagem de otimização energética e ambiental, através de índices de potencial/fragilidade conduz a valores extremamente baixos de potencial na bacia. O autor conclui que o problema de prospecção de potenciais hidroelétricos e seleção de sítios potenciais, na escala de bacia, não é abordagem por otimização, mas sim de escolha dirigida por alguns critérios de preferência, adicionando ao sistema uma metodologia baseada em apoio à decisão por múltiplos objetivos. Ao final o autor utiliza uma abordagem de hierarquização de alternativas aliada a um limite de corte.

Verifica-se a tendência para pesquisas de estimativas de potencial a partir de modelos em SIG, sem a necessidade de visitas em campo para investigação de dados cadastrais nos primeiros levantamentos. Os métodos de levantamento de potenciais hidroelétricos variam entre modelos determinísticos, com simulações de processos hidrológicos realizados por Larentis *et al.* (2010), Yi *et al.* (2010), e modelos não determinísticos, probabilísticos ou estocásticos, Rojanamon (2009) e Connolly *et al.* (2010). Estes autores utilizaram análises por múltiplos critérios, incluindo sempre a consideração conjunta de fatores ambientais e socioeconômicos.

Pesquisas em PCH foram ativamente realizadas até começo dos anos 90 (KIER,1983; KIER,1984; MST, 1985; KIER,1989; KIER,1990; KIER,1992) e recentemente Kwon e Kim (2006) analisaram o impacto de PCH no meio ambiente e sugeriram políticas

alternativas com respeito à localização. As mudanças consistem em ampliar os requisitos socioambientais aos estudos de levantamentos de potenciais hidrelétricos.

2.4.1 Variáveis e Indicadores utilizados

As principais variáveis utilizadas nos Sistemas de Informações (Sistemas de Informações Geográficas – SIG e Sistema de Apoio à Decisão - SAD) para estudos de prospecção de potenciais hidroelétricos pesquisados foram classificadas por área de conhecimento conforme a Tabela 2.6. As variáveis foram escolhidas, supondo escala de bacia hidrográfica, correspondente ao Nível 3 na nomenclatura da ANA. Conforme a nomenclatura da ANA os níveis variam de 1 a 6 conforme o grau de desagregação de ottobacias (PFAFSTETTER, 1989). O trecho de ottobacia corresponde à codificação de uma subbacia para um trecho de canal de rio. As variáveis selecionadas não são exaustivas e não excluem a aplicação de outras variáveis que representariam melhor os processos analisados. Houve restrições de uso devido à qualidade do dado, inexistência de metadados ou dificuldade de acesso à informação. As aplicações das variáveis, dos indicadores e dos parâmetros, associados aos modelos aplicados, serão avaliadas ao longo do trabalho.

Sejam quais forem as metodologias, haverá uma decomposição em critérios que têm como finalidade avaliarem-se impactos por diversos fatores. A cada critério é associada uma variável ou um grupo de variáveis, que deverão ser significativas e de fácil obtenção.

A realidade ambiental apresenta-se complexa, dispare e incapaz de ser caracterizada apenas segundo critérios qualitativos ou quantitativos. Não existe um indicador único que, sozinho, seja capaz comparar adequadamente o conjunto dos impactos socioambientais dos projetos hidrelétricos (ROSA, 1995). As variáveis e indicadores propostos, foram levantadas com base em modelos que utilizam múltiplos critérios, qualitativos e quantitativos, para uma melhor aproximação da realidade a ser analisada.

Tabela 2.6. Seleção de Variáveis e Indicadores utilizados nos estudos de Potencial Hidroelétrico com aplicação de SIG e SAD.

| Área de Conhecimento | Variáveis, Grupo de Variáveis ou Indicadores | Descrição das variáveis e dos impactos |
|---|--|--|
| Geomorfologia (Topografia e Sensoriamento Remoto) | Modelo Digital de Elevação por (radar interferométrico, sensores imageadores ou à Laser) ex. SRTM, GDEM/ASTER e LIDAR; | - Modelo Digital de Elevação; - Altura de queda – queda bruta; - Declividade; - Diferenças de nível; |
| Hidrologia ¹ | - Vazão Média ² ; - Vazões Extremas (mínima e máxima) ³ ; - Áreas de acumulação ⁴ ; - Vazão específica; - Pluviometria; | - Vazão Média nas Turbinas ⁴ ; - Vazão Média de Longo Período; - Vazão Máxima com tempo de retorno; - Vazão Mínima com tempo de retorno e curva de permanência; - Área de acumulação de fluxo e contribuição da bacia hidrográfica; |

| | | |
|--|---|--|
| Engenharia de Barragens (Técnico-Financeiro) ⁵ | - Tipo e características da barragem e vertedouro; | - Custos preliminares paramétricos baseados em vazão de dimensionamento do vertedouro e comprimento do barramento; |
| Socioeconômico (Infraestruturas existentes e Engenharia de Custos) | - Infraestruturas existentes (rodovias, ferrovias, obras de arte etc); | - Rodovias; - Ferrovias; - Obras de arte (pontes e viadutos); |
| Geração de Energia Elétrica ⁶ | - Potência Bruta - Energia Firme | - Potencia bruta do inventário hidroelétrico de UHE e PCH |
| Meio Ambiente - Antrópico ⁵ Impactos negativos | - Aglomerações Urbanas afetadas (residenciais, industriais e comerciais); - Custos Regionais; | - População removida; - Área requerida para minimizar custos regionais; - Perda de patrimônio histórico; - Número de famílias afetadas; - Aumento da incidência de doenças; - Qualidade imprópria da água ao consumo humano; - Nível de desemprego; - Potencialização de conflitos; |
| Meio Ambiente - Antrópico ⁵ Impactos positivos | - Melhorias em Infraestrutura; | - Melhorias em Transportes; - Melhorias em Eletrificação Rural; - Melhorias em Investimentos Sociais (Educação e Saúde); - Arrecadação de impostos; - Geração de Empregos; |
| Meio Ambiente - Físico e Químico ⁵ | - Geomorfologia fluvial à montante e jusante; - Qualidade da água; - Qualidade do ar; - Corpos d'água afluentes; | - Vazão - Diminuição e aumento; - Regime hidrológico - Alteração a dinâmica do meio aquático; - Fluxo de sedimentos; - Temperatura do rio e do lago da represa; - Áreas afetadas por eutrofização e reações químicas prejudiciais; - Área afetada do ar; |
| Meio Ambiente - Biota ¹⁶ | - Biota terrestre; - Biota aquático; - Outras biotas; | - Área afetada da biomassa, diversidade, recuperabilidade e perigo de extinção da biota terrestre, aquática ou outras; |

Fonte: 1 - HIDROTEC e TUCCI (1998), 2 – Cyr, Jean-François (2011), 3 - Larentis *et al.* (2010), 4 - Chow (1959), Cruz (1996) e Eletrobrás (2007), 5 - Eletrobras (2007), 6 - Adaptado de Souza (2000)

2.4.2 Modelos hidrológicos com aplicação de SIG

O uso de modelos hidrológicos espacialmente distribuídos possibilita o incremento das unidades espaciais de estudo em número e em detalhes, permitindo modelagens de nível regional e até continental (MAIDMENT, 1993). Como plataforma de trabalho, os Sistemas de Informação Geográfica - SIG têm sido utilizados para a geração de banco de dados que funcionam como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos, permitindo através dessa integração, a manipulação de dados espaciais e servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (SANTOS *et al.*, 2006; FILHO *et al.*, 2007).

Entre os primeiros modelos hidrológicos dinâmicos e com informações distribuídas, o Topmodel (BEVEN *et al.*, 1994) apud in Silva e Kobiyama (2007), utilizaram relações físicas para representar a bacia hidrográfica e os processos hidrológicos. Apesar da primeira publicação deste modelo ter sido em 1979 (BEVEN & KIRKBY, 1979), somente recebeu seu acrônimo TOPMODEL (Topography-based hydrological model) em 1994 (BEVEN *et al.*, 1994).

Os processos hidrológicos baseavam-se apenas no *déficit* de armazenamento que representava a disponibilidade da água no solo. A estrutura do modelo se baseava na discretização em sub-bacias, utilizava um fator topográfico baseado na área de contribuição e na declividade na malha, obtido em mapas detalhados, discretização com malha de comprimento definido, conforme citado em Tucci (2005). Este modelo dinâmico e distribuído foi pioneiro por utilizar dados em ambiente espacial.

Como resultado de muitos anos de interesse em dados geoespaciais, o United States Army Corps of Engineer's Hydrologic Engineering Center (HEC) elaborou ferramentas para modelagem hidrológica e hidráulica. A série de aplicativos HEC foi aperfeiçoada com possibilidade de tratar dados em ambientes espaciais e posteriormente foi desenvolvida a extensão HEC-GeoHMS, um projeto desenvolvido pelo Hydrology Engineering Center - HEC, Environmental Systems Research Institute - ESRI e apoio de MAIDMENT (1993) e outros do Center for Research in Water Resources in Austin, Texas, conforme indicado pelo US Army Corps of Engineers (2003).

O HEC-GeoHMS permite a integração do HEC-HMS na plataforma SIG da ESRI nos ArcView ou ArcGIS (DAVIS, 2009; OLIVERA, 2010). Os aplicativos do ArcHydro da ESRI (2002) baseiam-se nas pesquisas implementadas por Maidment (2002), originados de pesquisas de hidrologia em Modelos Digitais de Elevação - MDE, extração da drenagem a partir de modelo digital de terreno (TARBOTON, 1991), mapas de acumulação pelo processo D8 (TARBOTON, 1997), e pesquisas de JenSOn e Domingue (1998), BEVEN *et al.* (1994) e Wilson e Gallant, (2000) em tratamento de dados espaciais.

Atualmente, em ambientes SIG são integradas informações topográficas e hidrológicas por meio de dados distribuídos ("grid-data model") em matrizes (ex.: MDT, MDE, mapas de declividade, mapas de pluviometria, mapas de fluxo) e vetores (hidrografia, sub-bacias hidrográficas, estações hidrométricas). No ambiente SIG, também podem ser usados modelos concentrados ("lumped models") com atributos, parâmetros hidrológicos ou fisográficos, agregados aos polígonos das sub-bacias hidrográficas (ex. HEC-HMS e HEC-GeoHMS).

Os processos de análises hidrológicas podem ser realizados por modelos desacoplados a outros modelos (modelos atmosféricos, modelos de precipitação, infiltração, chuva-vazão etc.) ou acoplados. Pesquisas tem considerado a forma de integração de alguns modelos a modelos hidrológicos em ambiente SIG (ANDERSON *et al.*, 2002; BARTHOLMES e TODINI, 2005).

Conforme Punys (2011) as aplicações de hidrologia em ambiente SIG no ArcHydro (MAIDMENT, 2002) permitem a inclusão de outros parâmetros hidrológicos calculados em modelos hidrológicos especialistas. Punys (2011) afirma também que “muitos modelos hidrológicos atuais, sem o uso dos SIG para preparação de dados de entrada, não poderiam ser usados”.

Também, conforme Punys (2011), o uso do SIG pode se tornar impossível ou antieconômico em modelos hidrológicos e hidráulicos que requerem a preparação de dados de entrada por outros meios, como os modelos hidráulicos 1D ou 2D. Maidment (2000) cita um caso de aplicação separada em SIG para desenvolvimento de mapas com distribuição espacial de parâmetros de curva de permanência (Flow Duration Curve – FCD). Os parâmetros FCD obtidos das medições das estações hidrométricas, calculados por processos estatísticos, são transferidos para uma tabela de atributos em um novo plano de informação no SIG e posteriormente são usados para análises espaciais no SIG.

Punys (2011) ainda afirma que dados hidrológicos assistidos por aplicativos hidrológicos especializados estimam as vazões disponíveis para desenvolvimento energético como um componente crucial do projeto hidroelétrico, claramente determinando sua viabilidade. Por meio das ferramentas próprias dos SIG é possível um detalhado modelo digital da superfície para desenvolver estudos em leitos de rios e seus vales, incluindo estudos de posicionamento de barragens e imperfeições ao longo do leito do rio (MAIDMENT, 2000).

2.4.2.1 Vazões e Área de contribuição em bacias hidrográficas

As diferenças para aplicação das variáveis nos modelos matemáticos variam em função da abordagem do estudo e da fase de estágio da avaliação do potencial. Em estágio de análise preliminar e poucas medições cadastrais, algumas informações de vazões podem ser de difícil obtenção. Em alguns casos, a acurácia do modelo digital do terreno não possibilita resolução mais precisa da área de contribuição em um local qualquer da bacia hidrográfica. Estimativas de vazões turbinadas são de difícil aproximação nessa fase.

O exemplo da aplicação da vazão (Q_r) na solução da equação do Potencial Bruto (P_n) - “ $P_n = Q_r \times H_a \times 8.85$ ”, onde H_a é altura de queda, é apontada por Larentis *et al.* (2010) como vazão média de descarga passando pela turbina (Q_r). Larentis *et al.* (2010) propõem a determinação de Q_r por meio da seguinte equação:

$$Q_r = Q_{as} + Q_{acc} + Q_f - Q_{reman} - Q_{cons}$$

Onde Q_{as} é a vazão média regulada no reservatório; Q_{acc} é a taxa de descarga devido à vazão regulada por outras usinas a montante; Q_f é vazão firme natural que atravessa a seção (a regra assumida é utilizar 95% da duração da descarga); Q_{reman} é a vazão que permanece a jusante do barramento, calculada como uma fração do Q_f ; Q_{cons} é associada ao uso consuntivo à montante da usina. Ambas, Q_{as} e Q_{acc} são obtidas como

função da máxima depleção do reservatório e limitadas pelo potencial de vazão firme que pode ficar armazenado dentro do período de um ano.

Essa equação além de incluir as vazões médias afluentes no reservatório (Q_{as}) aborda a regularização do reservatório devido ao volume da barragem e critérios de depleção do reservatório. No estágio de prospecção de potenciais algumas informações não são possíveis de obter ou necessitariam de séries históricas e de modelos de otimização para solução das variáveis, conforme automatizado em programa computacional com aplicação de dados espaciais Hydrospot (LARENTIS, 2010).

Yi *et al.* (2010), na quantificação do fator hidrológico para prospecção de potenciais hidroelétricos, desconsideraram critérios de operação de reservatórios. Em suas pesquisas utilizaram, de forma mais simplificada, somente a área de contribuição à montante do ponto considerado e utilizou MDE com resolução de 90 metros para cálculo da área de contribuição. Para localização do fator hidrológico mais favorável o autor realizou uma ponderação do sítio observado em relação a todos os outros sítios da amostra, assumindo que as características de precipitação (regime pluviométrico) na bacia não são geralmente tão significantes quanto à área de contribuição.

Em outras pesquisas aplicadas a redução de incertezas em vazão de rios para aproveitamento hidroelétrico foi realizada regionalização de vazões em bacias hidrográficas por modelos de regressão regional (CYR, 2011). Outros estudos de regionalização de vazões utilizando MDE com 30 metros de resolução espacial foram realizados satisfatoriamente para sítios com baixas quedas em pequenos potenciais¹⁷ e para pequenos potenciais¹⁸ pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. Os resultados do modelo virtual de prospecção de hidroenergia (*Virtual Hydropower Prospector*) foram publicados em Lee *et al.* (2008).

Para determinação de vazões para estudos de potenciais hidroelétricos, Cyr (2011) aplicou regressão múltipla de atributos climáticos (médias anuais e desvios padrões de precipitação, temperatura e evapotranspiração) e atributos físicos de bacias hidrográficas (área de drenagem, perímetro da área de drenagem, elevação média).

Conforme Cyr (2011), em um dado local, o potencial hidroelétrico, P , pode ser calculado como: $P = \rho \times Q \times g \times h \times \epsilon$, onde P é o potencial bruto hidro energético, ρ é a densidade da água de 1000 Kg/m^3 , Q é a vazão média anual em uma série de longo período de vazões (m^3/s), g é a aceleração da gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$, h é a altura da queda bruta da água (m) e ϵ é o coeficiente de eficiência. Conforme Eletrobrás (2000), no Brasil sugere-se adotar como série histórica de longo período vazões médias mensais de 25 anos, que podem estar disponíveis conforme Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT¹⁹.

¹⁷ United States, Department of Energy. Water energy resources of the United States with emphasis on low head/low power resources. Cat. No. DOE/1D-11111. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory; 2004.

¹⁸ United States, Department of Energy. Feasibility assessment of the waterenergy resources of the United States for new low power and small hydro classes of hydroelectric plants. Cat. No. DOE/1D-11263. Idaho National Laboratory;2006.

¹⁹ <http://www.eletobras.gov.br/>

Cyr (2011) afirma que a região de News Brunswick no Canadá é provida de uma extensa rede hidrométrica para validação dos dados. Os dados das variáveis área de contribuição e vazão de longo período foram extraídos por aplicativos de SIG. O autor realizou combinações de variáveis físicas e climáticas para determinar aquelas que alcançam o maior valor de coeficiente de Pearson (R^2) em regressão linear múltipla. As variáveis espaciais de área de drenagem (A), amplitude de elevação (Dr), precipitação média anual (P), média de radiação solar anual (H) e temperatura média anual (T) foram significantes na estimativa da vazão média anual. Somente a variável “área de drenagem” alcançou R^2 de 0,977, para estimativa da vazão média anual, valor muito próximo às outras regressões com diversas variáveis. Porém, as regressões mais favoráveis adicionaram outras variáveis e sempre a área de drenagem (A) como uma das variáveis do modelo.

Tabela 2.7. Modelos de Regressão testados para estimar vazão anual.

| Regional regression models | R-squared | Average relative error | Error standard deviation |
|--|-----------|------------------------|--------------------------|
| 1 $e^{-3.492}A^{0.949}$ | 0.977 | 10.7 | 7.6 |
| 2 $e^{-15.458}A^{1.002}P^{1.653}$ | 0.988 | 9.1 | 6.2 |
| 3 $e^{-3.575}A^{0.935}S^{0.098}$ | 0.980 | 9.9 | 7.9 |
| 4 $A^{0.901}ETR^{-0.598}D^{0.028}$ | 0.996 | 14.0 | 8.7 |
| 5 $e^{-16.552}A^{0.977}P^{1.733}D^{0.133}$ | 0.993 | 6.5 | 5.9 |
| 6 $e^{-15.116}A^{0.988}P^{1.595}S^{0.084}$ | 0.991 | 8.0 | 6.0 |
| 7 $A^{0.9}H^{-2.791}Dr^{0.062}$ | 0.997 | 11.2 | 8.2 |
| 8 $e^{-14.71}A^{0.986}P^{1.675}ERT^{-0.168}S^{0.074}$ | 0.990 | 7.9 | 6.0 |
| 9 $e^{-13.896}A^{0.99}P^{1.768}H^{-1.691}T^{-0.035}$ | 0.989 | 8.7 | 6.3 |
| 10 $e^{-15.947}A^{0.962}P^{1.662}T^{-0.013}Dr^{0.119}$ | 0.992 | 7.1 | 6.2 |

Fonte: Methodology for the large-scale assessment of small hydroelectric potential, Cyr (2011).

Outro meio de estimar vazões aplicadas aos estudos de potenciais hidroelétricos é por modelos determinísticos para representar processos físicos. Em estudos de pequenas centrais hidroelétricas, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis das Filipinas (NREL, 2000) utilizou favoravelmente modelos chuva-vazão em pequena escala, utilizando modelos de elevação e grades de precipitação de 1 km² para estimativa de vazões.

Ribeiro *et al.* (2005) avaliou metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência (Q7,10, Q90 e Q95) aplicadas na bacia hidrográfica do rio Doce. As metodologias foram: a) Eletrobrás (1985), que utiliza equações de regressão regionais, aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas; b) Chaves *et al.* (2002), que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas; e c) interpolação linear, baseada no princípio da vazão específica. Os valores das vazões mínimas de referência, estimados utilizando-se as três metodologias, foram comparados com os valores observados em cada uma das 57 estações fluviométricas usadas na regionalização. O método que apresentou maior precisão foi o proposto pela Eletrobrás (1985), resultando em sete equações de regionalização de vazões, com erro relativo médio de 16,56 %. Dentre as características físicas e climáticas usadas na regionalização, a área de drenagem foi a que melhor explicou o comportamento das vazões mínimas na bacia do Rio Doce,

estando presente na maioria das equações de regressão apresentadas. As demais metodologias foram mais eficientes na estimativa de vazões em situações em que a seção onde se deseja determinar a vazão está localizada entre dois postos de vazão conhecida. Dentre as características físicas e climáticas usadas na regionalização, a área de drenagem foi a que melhor explicou o comportamento das vazões mínimas na bacia do rio Doce, estando presente na maioria das equações de regressão apresentadas.

As técnicas de determinação de regiões homogêneas para regionalização de vazões hidrológicas foram estudadas por vários autores (MIMIKOU; 1990; ZARRIN *et al.* 2009; CHAVES, 2002; COSER, 2003; BAENA *et al.*, 2004; LISBOA, 2008; ALMEIDA, 2010). Almeida (2010) ao revisar os estudos das metodologias de regionalização, utilizou recursos de SIG para espacializar variáveis hidrológicas. Estudos recentes utilizam essas ferramentas por facilitar o tratamento das bases de dados, explorando-se ao máximo as informações hidrológicas existentes, a montante e a jusante de pontos de interesse.

A ANEEL (<http://www.aneel.gov.br/>) gerencia um imprescindível sistema de informação hidrológica – SIH, com dados hidrometeorológicos das principais bacias hidrográficas brasileiras. Tais dados podem ser obtidos individualmente pela Internet. O Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT²⁰, da ELETROBRÁS (<http://www.eletronbras.gov.br/>) possui dados físicos operativos das principais usinas hidrelétricas do Sistema Interligado.

Portanto, em países com poucas informações de dados de vazão são realizados estudos como os de regionalização das curvas de permanência de vazões, simulação chuva vazão e o cálculo da vazão específica, conforme recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1994). Verifica-se, entre as variáveis, a relevância da extração de dados de área de drenagem (ou área de contribuição) para a estimativa de vazões médias de longo período em estudos de potenciais hidroelétricos. Recomenda-se o uso de técnicas de regionalização e ajustes de equações regionais limitadas às escalas estabelecidas pelas equações de regiões hidrologicamente diferentes (SILVEIRA *et al.*, 1998; TUCCI, 2000).

2.4.2.2 Extrações dos dados de área de contribuição

Beven e Kirkby (1979) propuseram a extrapolação dos dados de vazão de longo período considerando a área drenada à montante de cada célula denominada de área de contribuição. Em regiões onde não existe monitoramento hidrológico a estimativa de vazões pode ser feita a partir da extrapolação e interpolação de dados de vazão específica.

A Eletrobrás (1985) recomenda que se utilize o cálculo das vazões, tendo, como base, as áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e, ou a jusante do local, onde se deseja estimar a vazão. Essa recomendação não aplica o conceito de

²⁰ SIPOT - <http://www.eletronbras.gov.br/>

regiões hidrologicamente homogêneas, o que viabiliza sua aplicação em pequenas bacias hidrográficas com número reduzido de postos hidrométricos, pois, não há limitação em termos de graus de liberdade, por não utilizar equações de regressão nas estimativas de vazões (RIBEIRO *et al.*, 2005).

Em ambiente SIG, um método de extrair área de drenagem de bacias hidrográficas a partir do MDE foi inicialmente apresentado por Jenson e Domingues (1988). Um método analítico para determinar valores limites apropriados para delineamento de rede de drenagem foi apresentado por Tarboton *et al.* (1991). Esses algoritmos foram posteriormente adaptados às plataformas SIG facilitando a entrada de dados e a geração de mapas derivados do MDE (ESRI, 2012).

A nomenclatura utilizada nos SIG para tratamento dos componentes de uma bacia hidrográfica deve ser corretamente entendida para sua aplicação. Importante também o entendimento da interrelação/conexão das feições geográficas para a compreensão da topologia. Para tratar espacialmente o escoamento superficial considera-se a bacia de drenagem como a área que drena a água para um mesmo exutório ("outlets"). Dessa forma, a rede de drenagem, canais de drenagem ou curso de água ("streams"), percorrida pela água deve estar conectada a um mesmo exutório. O conjunto de sub-bacias que captam água para um mesmo exutório forma uma bacia hidrográfica. Esse exutório é geralmente o ponto mais baixo ao longo dos limites da bacia de drenagem. O termo área de drenagem é também chamado de área de contribuição, área de captação ou área à montante ("catchment area"). Uma matriz de acumulação de fluxo indica a área de contribuição, que deve ser especificada como o mínimo número de células que formam a rede de drenagem (ESRI, 2012). Os termos utilizados estão apresentados graficamente a seguir:

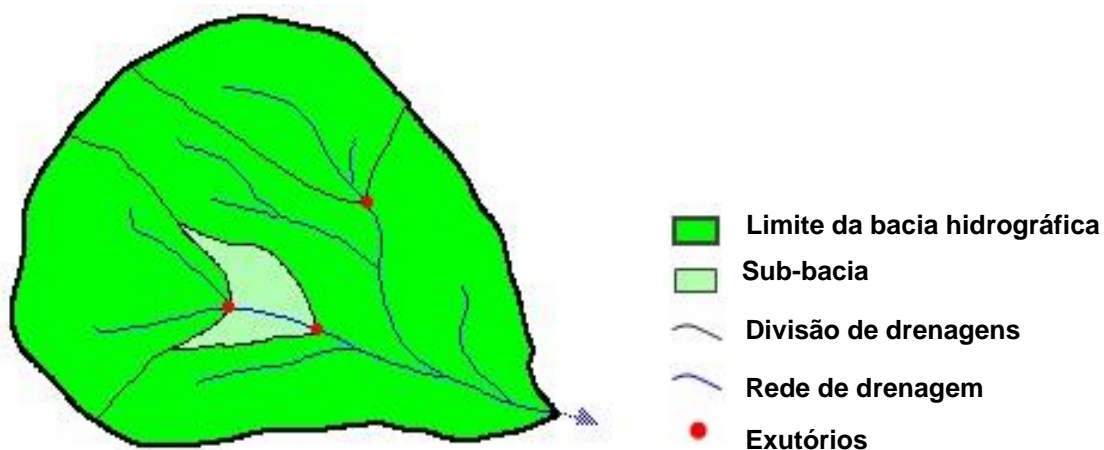


Figura 2.9. Termos utilizados para a bacia hidrográfica. Fonte: Modificado da documentação do ArcGIS 10, Understanding drainage systems, ESRI (2012).

Os processos para funções da extração de informações físicas da hidrologia da bacia hidrográfica estão apresentados em ESRI (2012), conforme extensão "ArcGIS Spatial Analyst". As ferramentas permitem determinar sequencialmente as depressões ("sinks"), direção de fluxo ("flow direction"), fluxo de acumulação ("flow accumulation"), comprimento dos canais de drenagem a montante e à jusante ("flow length"),

delineamento das bacias ("watersheds"), e criação dos canais de drenagem ("stream networks").

Tabela 2.8. Processos para dados fisiográficos das bacias a partir do MDE.

| Etapas dos Processos | Referências bibliográfica | Processo |
|---|--|---|
| Delimitação do MDE estudado | ESRI (2012) | Define a área da bacia hidrográfica (utilizar como referência as delimitações ANEEL e ANA) |
| Preenchimento das depressões | Tarboton (1991) | Preenche as depressões para remover as imperfeições do MDE |
| Geração da direção de fluxos | Jenson <i>et al.</i> (1988) | Cria uma imagem matricial a partir de cada célula com seus vizinhos mais abaixo (Método D8) |
| Geração do mapa de acumulação de fluxos | Jenson <i>et al.</i> (1988); Tarboton <i>et al.</i> (1991); | Cria uma imagem matricial do fluxo acumulado de cada célula. Representa o número de células da área de contribuição à montante. |
| Ordenamento dos canais de drenagem | Tarboton <i>et al.</i> (1991); | Atribui ordem numérica aos segmentos da imagem matricial representando ramos dos canais de drenagem |
| Geração dos comprimentos de fluxos | Tarboton <i>et al.</i> (1991) | Calcula a distância à montante e à jusante de cada célula da matriz. |
| Geração dos canais de drenagem | Tarboton <i>et al.</i> (1991) | Converte a imagem raster representando a rede de drenagem em vetores de canais de drenagem |
| Geração das sub-bacias | ESRI (2012) | Cria um polígono representando a bacia de contribuição a partir de um ponto determinado da bacia hidrográfica. É necessária a informação de direção de fluxo e dos pontos de determinação da área à montante. |

A sequência aplicada para geração de mapas derivados seguem as seguintes etapas:

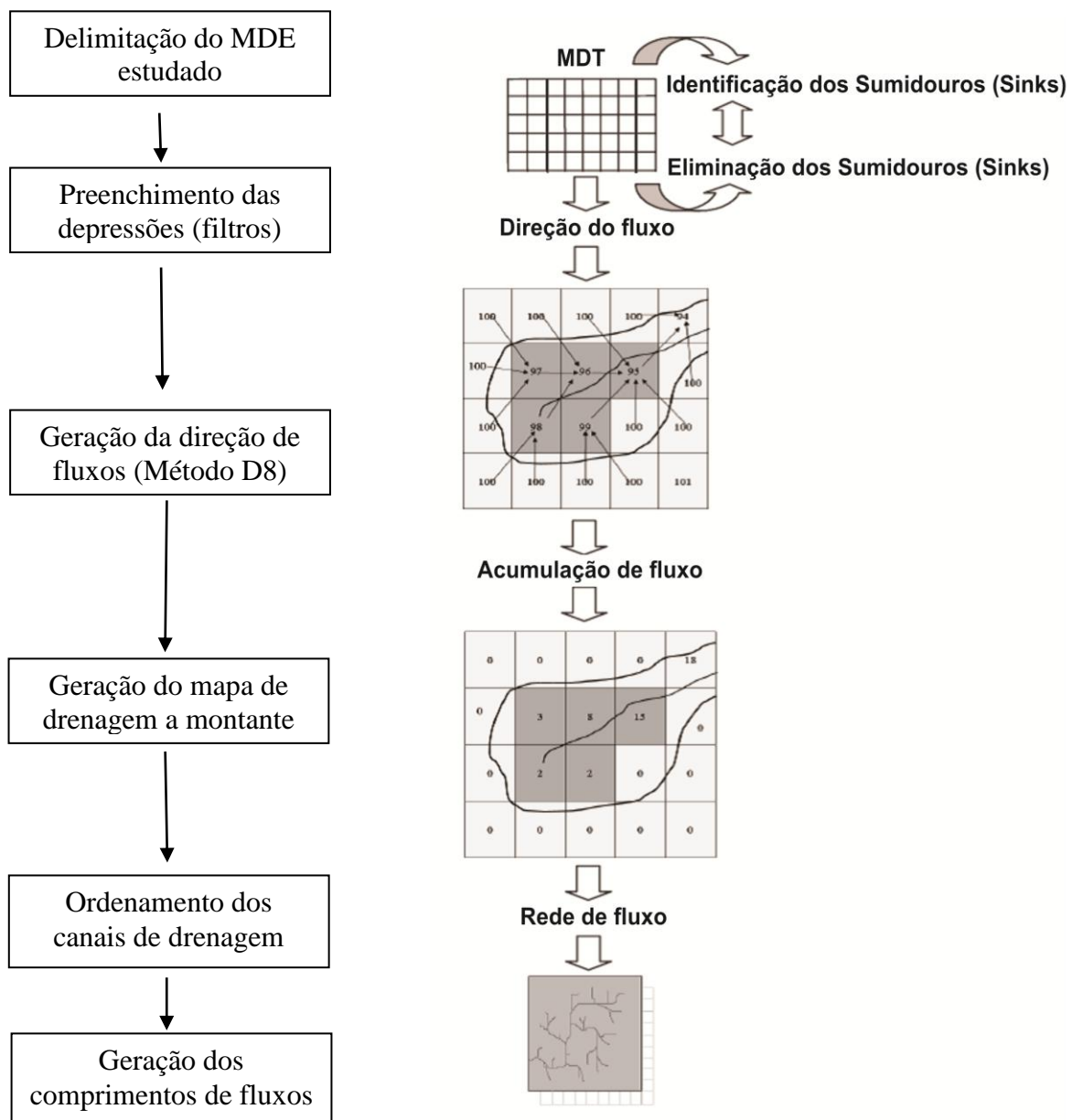


Figura 2.10. Sequencia aplicada para geração de mapas derivados do MDE. Extraído de SANTOS *et al.* (2006).

Um MDE sem a presença de depressões é desejável para o processo do cálculo da direção do fluxo (ESRI, 2012). Porém, as depressões podem ser por fatores naturais, particularmente em áreas glaciais e áreas cársticas (MARK, 1988). As depressões podem causar problemas na junção dos canais de drenagem e resultar em má definição de sub-bacias.

Conforme ESRI (2012) muitas depressões podem ser por imperfeições de MDEs. Outra causa comum de erros por depressão resulta no armazenamento de dados do MDE em forma de números inteiros. Devido à acurácia, áreas com baixa declividade podem ser identificadas no MDE como áreas planas.

Para corrigir áreas de depressões nos MDE foram desenvolvidos algoritmos para o preenchimento de depressões em MDE (MARKS *et al.*, 1984; O'CALLAGHAN e MARK, 1984; JENSON e DOMINGUE, 1988). Entre eles, o método apresentado por JENSON e Domingues (1988), é um dos métodos mais conhecidos e largamente utilizados em muitos pacotes de SIG para preenchimento de depressões. Esse método é o utilizado no sistema do ArcGIS (ESRI, 2012). Consistem basicamente em técnicas de filtragem. As técnicas de filtragem são transformações da imagem "pixel" a "pixel", que dependem do nível de cinza de um determinado "pixel" e do valor dos níveis de cinza dos "pixels" vizinhos, na imagem original, ou seja, o pixel "filtrado" tem um valor dependente do contexto em que ele se encontra na imagem original.

É importante entender a morfologia da área suficientemente o bastante para identificar quais são as verdadeiras depressões que devem ser consideradas e quais são meramente erros de dados do MDE (ESRI, 2012).

Segundo documentação do ArcGIS (ESRI, 2012), uma das etapas para derivar características hidrológicas do MDE é a geração do mapa de direção do fluxo. No processo D8 existem oito direções válidas relacionando as oito células adjacentes em uma matriz nas quais o fluxo pode ocorrer a partir de uma célula central. O algoritmo que descreve as direções do escoamento foi desenvolvido por O'Callaghan e Mark (1984) e ficou conhecido como Algoritmo Deterministic 8 (D8). Essa abordagem é referenciada como o método D8, apresentado por Jenson e Domingue (1988). Para obter uma representação mais acurada da direção do fluxo sobre a superfície, o preenchimento das depressões deve ter sido realizado na etapa anterior.

O método D-infinito utiliza a declividade mais íngreme de uma face triangular (TARBOTON, 1997), possibilitando variações de 0 a 2π radianos. O ângulo da direção do fluxo é determinado utilizando uma grade de células de 3x3 centrada na célula de interesse.

No caso em que os vetores de declividade à jusante não sejam positivos, na direção do fluxo é utilizado o método de Garbrecht e Martz (1997) para determinação do fluxo em áreas planas. Esse método estabelece canais de fluxo em áreas planas, considerando elevações superiores em um conjunto de direções de fluxo.

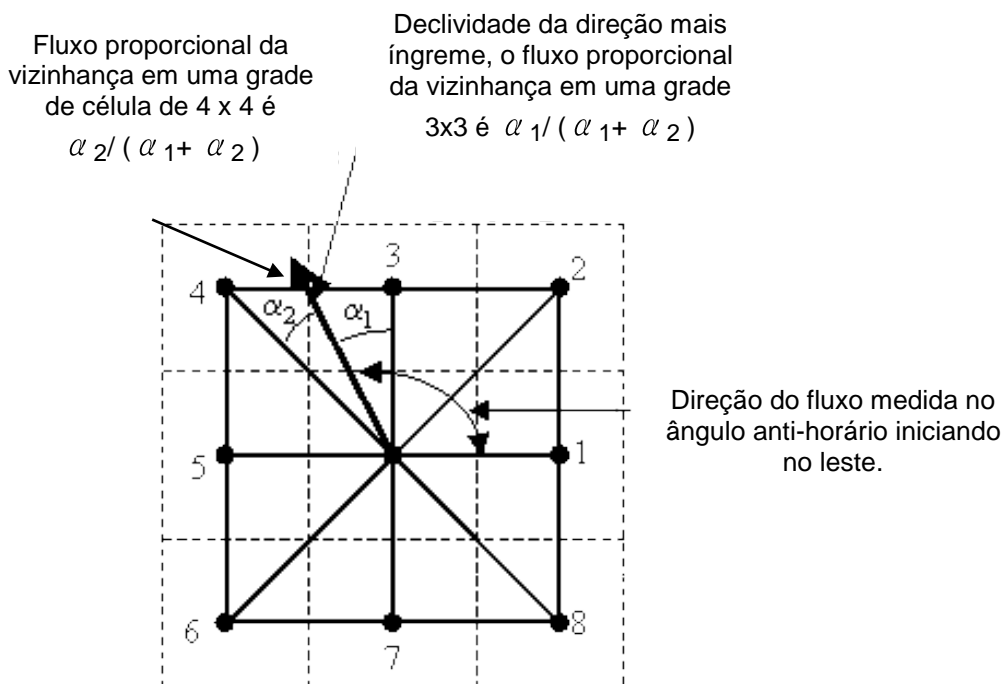


Figura 2.11. Representação da direção de fluxo pelo método D-infinito (TARBOTON, 1997).

Com a informação da direção do fluxo na bacia, computa-se o número de células acima de uma célula qualquer na rede de drenagem para determinar o fluxo acumulado naquela célula, ou, o mapa de acumulação do fluxo. Esse número de células de acumulação corresponde ao número digital do pixel na matriz de acumulação de fluxo. Os resultados da acumulação de fluxo podem ser usados para criar a rede de canais de drenagem aplicando valores limites e para selecionar conjunto de células com altos valores de acumulação de fluxo (ESRI, 2012). A área da célula pixel (valor em unidades métricas do pixel) multiplicada pelo número digital do pixel determina a área de contribuição à montante para cada célula.

O ArcHydro (MAIDMENT, 2002), um software de mapeamento SIG para recursos hídricos, foi utilizado para espacializar dados de estações hidrométricas do United States Of Geological Service (USGS, 2010), delinear bacias hidrográficas e redes de drenagem, gerar mapas de acumulação de fluxos, e utilizar os dados da estação hidrométrica em análises matriciais (análises espaciais com dados distribuídos). Essa ferramenta utiliza o método D8.

2.4.2.3 Interpoladores Kernel e por Krigagem

Conforme Ramachandra e Srinivas (2006), “fenômenos hidrológicos como precipitação, vazões e secas são inerentes a fenômenos randômicos da natureza. Devido a complexidade do sistema hidrológico, esses processos não são completamente compreendidos e a confiabilidade dos modelos matemáticos determinísticos ainda está por ser desenvolvida”.

Com o objetivo de apoiar análises de projetos de estruturas hidráulicas e infraestruturas, abordagens geoestatísticas têm sido comumente adotadas. Alguns trabalhos têm proposto utilização de geoestatística para escalonar e regionalizar dados e parâmetros hidrológicos, Chokmani e Ouarda (2004), Ramachandra e Srinivas (2006), Skøien *et al.* (2006); Skøien e Blöschl (2007), Wagener *et al.* (2007), Castiglioni *et al.* (2009). Esses métodos de regionalização têm sido revistos para aplicações em vazões médias e vazões extremas, inclusive para estimar parâmetros de modelos de chuva-vazão.

Ramachandra e Srinivas (2006) afirmam “que não existe melhor modelo para escalonar e regionalizar em hidrologia que possa ser utilizado em todos os casos. Segundo o autor, o método preferencialmente escolhido deve depender do propósito do estudo, da disponibilidade de dados e da natureza da variabilidade hidrológica subjacente”.

Conforme sugere Castiglioni *et al.* (2009), a literatura recente reporta duas diferentes abordagens para aplicar interpolação espacial ao problema de predição de regime de vazões em rios com ausência de estações hidrométricas. A primeira, denominada "Topological Kriging" ou Topkriging, usa dados da grade de células (imagem matricial) para descrever a morfologia da área de estudo e interpolar espacialmente os parâmetros de vazão (índices de vazão, vazões mínimas) em células pertencentes à rede de drenagem (SKØIEN *et al.*, 2006; SKØIEN e BLÖSCHL, 2007). Uma segunda abordagem interpola espacialmente um determinado índice hidrométrico (ex.: vazão máxima ou mínima com um dado período de retorno) em duas dimensões de espaço (latitude e longitude) adicionando descritores climáticos (CHOKMANI e OUARDA, 2004).

Verifica-se que os métodos de interpolação de dados e parâmetros hidrológicos, inclusive descritores climáticos e fisiográficos em escala de bacia hidrográfica, podem ser realizados por análises espaciais de superfícies em ambiente SIG. Segundo Camargo *et al.* (2001), os modelos Kernel e Kriging objetivam gerar superfícies a partir de procedimentos de interpolação. Apesar das aplicações dos modelos Kernel às regionalizações de fenômenos naturais (RADINGER, 2013; FERNANDEZ *et al.*, 2006) e dos modelos Kriging (ALLEY, 1993; WALLER e GOTWAY, 2004; WACKERNAGEL, 2003), o enfoque da aplicação dos modelos Kernel e Kriging não é único.

O Kernel (SILVERMAN, 1986) é classificado como modelo determinístico de efeito local²¹, enquanto o Kriging é considerado um modelo estatístico local e global²². Conforme o tratamento e a disposição espacial da variável (hidrológica, climática ou

²¹ Modelos determinísticos de efeitos locais: cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas, utilizando funções como inverso do quadrado da distância. A suposição implícita é que predominam os efeitos puramente locais. Neste caso, não é feita qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial. Fonte: Camargo (2001).

²² Modelos estatísticos de efeitos locais e globais (krigagem): cada ponto da superfície é estimada apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas, utilizando um estimador estatístico. Fonte: Camargo (2001).

fisiográfica) haverá um interpolador mais adequado. Camargo *et al.* (2001), afirma que Kernel é um refinamento dos estimadores determinísticos de efeitos locais com uma função de ponderação mais complexa que a média simples ou o Inverso do Quadrado da Distância - IDW. Esta classe de estimadores é descrita na literatura como "kernel estimator" ou "Kernel density", ou, estimadores de densidade não-paramétricos. Estes estimadores generalizam a ideia de média móvel local, ao supor que a densidade do fenômeno varia localmente de forma suave, sem "picos" nem "descontinuidades". Seu objetivo é produzir superfícies mais suaves, que se espera mais representativas de fenômenos naturais e socioeconômicos.

Um "kernel estimator" é um estimador cujos parâmetros básicos são: (a) um raio de influência que define a vizinhança do ponto a ser interpolado; (b) uma função de estimação com propriedades "convenientes" de suavização do fenômeno (CAMARGO *et al.*, 2001).

Camargo *et al.* (2001) descreve que a estrutura teórica da krigagem²³ está baseada no conceito de variável regionalizada, desenvolvida por Matheron (1971). Uma variável regionalizada é uma variável distribuída no espaço (ou tempo) cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória (ou processo aleatório, ou campo aleatório, ou processo estocástico). Esta teoria permite incluir hipóteses estatísticas em processos espaciais locais. A krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima²⁴. A variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes: a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual. O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de Krigagem, pois permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço.

A aplicação de SIG permite que os dados hidrológicos sejam regionalizados por interpoladores Kernel e Kriging, respeitando as devidas restrições. Desde que essa imensa base de dados de informações hidrológicas esteja regionalizada e disponível para análises, elas podem ser exportadas em dados tabulares em ferramentas de SIG, com a referência espacial ou não, e analisadas em aplicativos estatísticos para análise multivariada de dados. Conforme estudos de Peterson *et al.* (2011), "análises multivariadas de dados em hidrologia podem aplicar análises de regressão linear

²³ Kriging, também muitas vezes traduzido como Krigagem, é um método de regressão usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados. A teoria de Kriging foi desenvolvida a partir dos trabalhos do seu inventor, Daniel G. Krige, pelo matemático francês Georges Matheron, no começo dos anos sessenta. Na comunidade estatística, também é conhecido como "Processo Gaussiano de Regressão". A estimação com base em apenas um atributo insere-se no âmbito da Krigagem; a estimação de um atributo à custa de outros atributos insere-se no âmbito da Co-krigagem. Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Kriging>, acessado em 12/8/2013.

²⁴ Estimativas não tendenciosas significam que, em média, a diferença entre valores estimados e observados para o mesmo ponto deve ser nula; e variância mínima significa que estes estimadores possuem a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos.

múltipla, análises de tendência, análises de componentes principais, entre outras, com objetivos de obter uma específica assinatura hidrológica da bacia hidrográfica”.

2.4.2.4 Modelo de Regressão Espacial - GWR

Modelos de regressão espacial, em geral, buscam estabelecer relações entre duas ou mais variáveis quantitativas, de modo que uma variável possa ser prevista a partir de outra, no caso de modelos univariados, ou a partir de várias, no caso de modelos multivariados (Neter *et al.*, 1996). O **Geographically Weighted Regression - GWR**, ou **Regressão Ponderada Geograficamente**, é um exemplo de técnica de análise exploratória que busca ajustar um modelo de regressão a cada ponto observado, ponderando todas as demais observações como função da distância a este ponto (DRUCK *et al.*, 2004).

A técnica GWR apresentada por Fotheringham *et al.* (2002) gera modelos de regressão linear com efeito local considerando o posicionamento espacial das variáveis. Câmara *et al.* (2005) explica a função da ponderação local em função das variáveis próximas a esse ponto: “a idéia é ajustar um modelo de regressão a cada ponto observado, ponderando todas as demais observações como função da distância a este ponto. Serão feitos tantos ajustes quantas observações existirem e o resultado será um coeficiente de ajuste para cada localização. Estes coeficientes podem ser apresentados visualmente para mostrar como se comportam espacialmente os relacionamentos entre as variáveis. Esta técnica é denominada regressão ponderada espacialmente e permite, através da inferência dos coeficientes de regressão locais, estimar as variações espaciais das medidas territorializadas”.

Segundo Magno (2011), os modelos de regressão espacial podem variar de acordo como o interesse do estudo, e podem ser aplicados com efeito espacial global e efeito espacial local. Os coeficientes de regressão do GWR possibilitam refletir a heterogeneidade espacial, observando a tendência espacial de forma contínua com os parâmetros variando no espaço.

Uma equação de regressão não espacial explicativa do modelo de regressão linear é:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i$$

onde:

- Variável Dependente (y): é o fenômeno modelado;
- Variáveis explicativas (x) ou preditoras: são as variáveis independentes que influenciam diretamente ou hipoteticamente e explicam a variável dependente;
- Coeficientes (β): São os valores, calculados pela ferramenta de regressão, que indicam a relação e o peso de cada variável explicativa para a variável dependente. São chamados de parâmetros do modelo. O coeficiente β_0 é denominado intercepto;

- Resíduos: (ε): é o erro assumido, correspondente a parte da variável dependente que não é explicada pelo modelo. Assume-se que a média de ε é normalmente distribuído e a média é zero.

Oliveira (2006) afirma que “tipicamente, quando se faz uma análise de regressão, procura-se alcançar dois objetivos: (a) encontrar um bom ajuste entre os valores preditos pelo modelo e os valores observados da variável dependente; (b) descobrir quais das variáveis explicativas contribuem de forma significativa para este relacionamento linear. Para tanto, a hipótese padrão é que as observações não são correlacionadas, e conseqüentemente, que os resíduos do modelo também são independentes e não-correlacionados com a variável dependente, tem variância constante, e apresentam distribuição normal com média zero”.

No caso dos dados espaciais, quando está presente a auto correlação espacial, a estimativa do modelo de regressão deve incorporar esta estrutura espacial, uma vez que, a dependência entre as observações altera o poder explicativo do modelo. A significância dos parâmetros é usualmente superestimada, e a existência de variações em larga escala pode até mesmo induzir a presença de associações espúrias (Câmara, 2002).

Segundo Câmara (2002) a inclusão explícita de efeitos espaciais em modelos de regressão pode ser feita de diferentes formas: (i) Modelo de Regressão com Efeitos Espaciais Globais; (ii) Modelo de Regressão com Efeito Espacial Local.

No modelo de regressão com efeitos espaciais globais, a estrutura de correlação espacial é capturada num único parâmetro, o qual é acrescentado à estrutura do modelo de regressão tradicional (CÂMARA, 2002).

No modelo de regressão com Efeito Espacial Local o processo espacial é não-estacionário, os coeficientes de regressão precisam refletir a heterogeneidade espacial. Para tanto, há duas grandes alternativas: (i) modelar a variação espacial de forma discreta, ao dividir o espaço em sub-regiões estacionárias, chamadas de regimes espaciais; (ii) modelar a tendência espacial de forma contínua, com parâmetros variantes no espaço (CÂMARA, 2002).

As equações com efeito espacial local estão descritas a seguir (CÂMARA, 2002):

Modelagem de forma discreta:

$$Y_1 = X_1 \beta_1 + \varepsilon_1$$

$$Y_2 = X_2 \beta_2 + \varepsilon_2$$

$$Y_3 = X_3 \beta_3 + \varepsilon_3$$

A região de estudo é dividida em sub-regiões e as regressões são realizadas em separado.

Modelagem de forma contínua:

$$Y(s) = \beta(s)X + \varepsilon$$

Aplicação baseada no GWR (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002 e MITCHELL, 2005)

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$\beta (s) = (X^T W(s) X)^{-1} X^T W(s) Y,$$

Onde X^T é a matriz transposta das variáveis independentes, β é um parâmetro das variáveis independentes, W é a matriz de proximidade espacial. O produto $W (s) Y$ expressa a dependência espacial em Y .

A matriz de proximidade espacial é calculada das seguintes formas:

$$w_{ij}(s, \tau) = \frac{1}{2\pi\tau} \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\tau^2}\right) \quad \text{Estimador Gaussiano típico;}$$

$$w_{ij} = \exp\left[-\frac{d_{ij}^2}{b^2}\right] \quad \text{Software GWR - Caso Fixo;}$$

$$w_{ij} = \left(1 - \frac{d_{ij}^2}{b^2}\right)^2 \quad \therefore d_{ij} \leq b \quad \text{Software GWR - Caso Adaptativo (Kernel).}$$

$$w_{ij} = 0 \quad \therefore d_{ij} > b$$

Segundo Oliveira (2006), “no diagnóstico dos modelos de regressão com efeitos espaciais, a análise gráfica dos resíduos é 0 (zero), primeiro passo para avaliar a qualidade do ajuste da regressão. Mapear os resíduos, buscando indícios de ruptura dos pressupostos de independência, é uma etapa importante na análise dos resultados. Uma alta concentração de resíduos positivos (ou negativos) numa parte do mapa é um bom indicador da presença de autocorrelação espacial”.

A ESRI desenvolveu algoritmo da técnica de regressão ponderada geograficamente GWR na plataforma ArcGIS (MITCHELL, 2005). No aplicativo o GWR define uma equação de regressão local para cada feição no conjunto de dados. Quando os valores de uma variável independente se agrupam espacialmente poderá haver multicolinearidade local. O aplicativo testa a multicolinearidade nesse caso para valores pré-definidos. Também os testes Akaike Information Criterion – AIC e Validação Cruzada (Cross Validation – CV) são realizados por meio da escolha da largura de banda apropriada, de modo a determinar um grau de suavidade do modelo (ajuste da equação de regressão local). Um teste para avaliar a redundância entre as variáveis independentes é o Variance Inflation Factor - VIF, uma forma de verificar a multicolinearidade entre duas variáveis independentes. O aplicativo recusa valores maiores que 7,5, devendo o usuário remover as variáveis independentes uma a uma.

Os parâmetros de configuração do modelo GWR no ArcGIS são: tipo de Kernel (para o caso adaptativo), método da largura de banda, distância e número de parâmetros de vizinhança. O método não é apropriado para pequenas bases de dados.

Os resultados apresentados são mapas de coeficientes, mapa de resíduos e relatório estatístico. Os mapas de coeficientes são imagens matriciais. O somatório da

multiplicação de cada coeficiente pela imagem da variável independente resultará no mapa de predição, conforme a Figura 2.12.

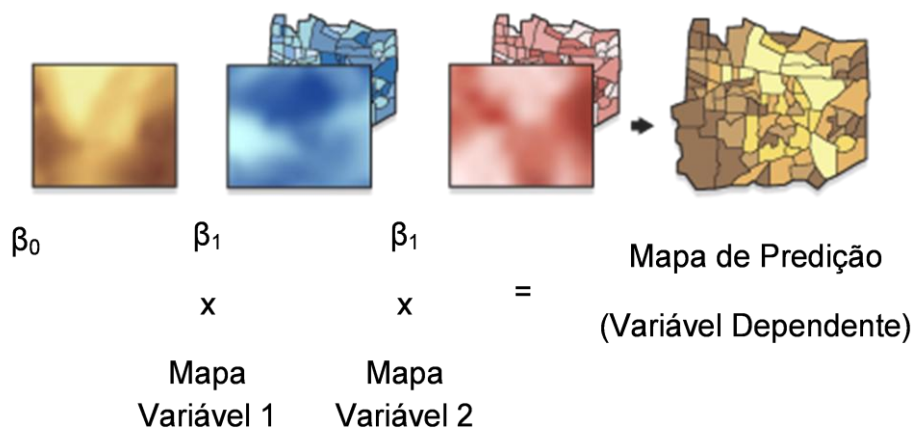


Figura 2.12. Esquema da associação dos mapas de coeficientes e mapas de variáveis. Fonte: Regressão Ponderada Geograficamente, ESRI/ArcGIS acessado em 14/8/2013, localizado em http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Geographically_Weighted_Regression_GWR/005p00000021000000/

2.4.3 Modelo Digital de Terreno

Uma importância no campo da história dos Sistemas de Informações Geográficas foi o desenvolvimento dos Modelos Digitais de Elevação – MDE e de Modelo Digital do Terreno - MDT. Eles possibilitaram estudos da forma do solo em curto espaço de tempo, e permitem acesso a muitas características hidrológicas e morfológicas de uma bacia hidrográfica (PUNYS, 2011).

Conforme Punys (2011), atualmente a fonte de dados para aplicações em planejamento e desenvolvimento de projetos hidroelétricos podem vir de várias fontes como dados do LIDAR (*Light Detection and Ranging*), mapas topográficos, imagens de satélite ou levantamentos aerofotogramétricos. Cada fonte requer diferentes tecnologias para processamento de dados. Punys (2011) afirma que “a análise do MDE em conjunto com outros temas (ex. uso e ocupação do solo, área de proteção ambiental) permite estimativas mais acuradas do planejamento hidroelétrico quando são considerados os aproveitamentos hidroelétricos já existentes”.

O uso da tecnologia LIDAR somente para projetos de Pequenos Centrais Hidroelétricas – PCH tem custo proporcionalmente elevado e não compete com as práticas comuns de geração de MDE (FELIX e DUBAS, 2010). No entanto, Punys (2011) afirma que essa situação rapidamente está mudando devido ao uso multidisciplinar para diferentes aplicações como trabalhos cartográficos, mapas de inundação, florestas e projetos de rodovias.

Em levantamento de várias tecnologias e ferramentas SIG aplicadas ao estudo de potenciais hidroelétricos no mundo, Punys (2011) verificou que a aplicações para detectar quedas de elevação tem sido realizadas pela superposição de canais de drenagem sobre o MDE. Afirma o autor que a integração do MDE com temas de séries

temporais de precipitações, curvas de permanência e vazões anuais em ambiente SIG, permite a identificação de mapas de energia e potência.

O esquema proposto por Punys (2011) na Figura 2.13 utiliza como dado de entrada o MDE, a rede hidrográfica e meteorológica, vazões nos canais e temas do meio ambiente. As informações utilizadas para o cálculo do potencial bruto hidroelétrico são topográficas e hidrológicas. A informação hidrológica da área de contribuição na Figura 2.13(c) é obtida do MDE. Na Figura 2.13(e) pôde ser definido o potencial bruto pela equação " $P = 9,81 \cdot Q_i \cdot \Delta H_i$ ". A proposta pode ser automatizada em aplicativo SIG, porém, conforme afirma o autor somente "a exclusão dos sítios com aproveitamento hidroelétrico dentro de parques ou áreas ambientais sensíveis ou excludentes irá resultar no verdadeiro potencial hidroelétrico" (Figura 2.13(f)).

A Figura 2.13 apresenta um esquema simplificado proposto por Punys (2011) para identificação de potencial hidroelétrico, utilizando informações espaciais a partir de um MDE em um ambiente SIG. (a) bacia hidrográfica estimada para o desenvolvimento do potencial; (b) o rio é separado em segmentos com partes iguais para a extração da informação da elevação em cada vértice; (c) a cada vértice é atribuído uma área de contribuição da bacia; (d) cálculo de vazões mensais em cada segmento para obter dados de entrada em planos de informações; (e) cálculo de potencial bruto hidroelétrico; (f) avaliação de outros fatores limitantes (tal como áreas de proteção, agricultura e florestas).

O esquema proposto por Punys (2011), apesar de mostrar a importância do MDE para extração de informações hidroenergéticas, apresenta-se simplificado, mas de utilidade para estudos de prospecção. Não são considerados os arranjos que podem ser feitos por meio de transposição de rios ou usinas a fio d'água, conforme implementado pelo algoritmo Hydrospot em Larentis *et al.* (2010). Também, na Figura 2.13(f) não são propostas considerações de fatores ambientais. Em geral as abordagens dos autores demonstram que o estudo de potencial hidroelétrico, apesar da importância das informações da geomorfologia e da hidrologia da região, abrange estudos que vão além das análises em modelos físicos.

Quanto ao MDE utilizado para estudos de potenciais hidroelétricos, Punys (2011) afirma que em países com tecnologia mais avançada, não há necessidade de produzir MDE para realização de estudos porque eles já estão desenvolvidos para todo o país. Muitos países tem também criado seus bancos de dados SIG de redes hidrográficas e áreas de proteção ambiental, uso e ocupação do solo e outras áreas. Afirma Punys (2011) que entre os casos mencionados, alguns países introduziram sistemas avançados de monitoramento do clima e qualidade da água, com envio automatizado de dados diretamente para banco de dados SIG e disponibilização pela WEB (ex. Estados Unidos da América). O autor afirma que nesse aspecto existe bastante diferença na qualidade dos dados utilizados entre os países.

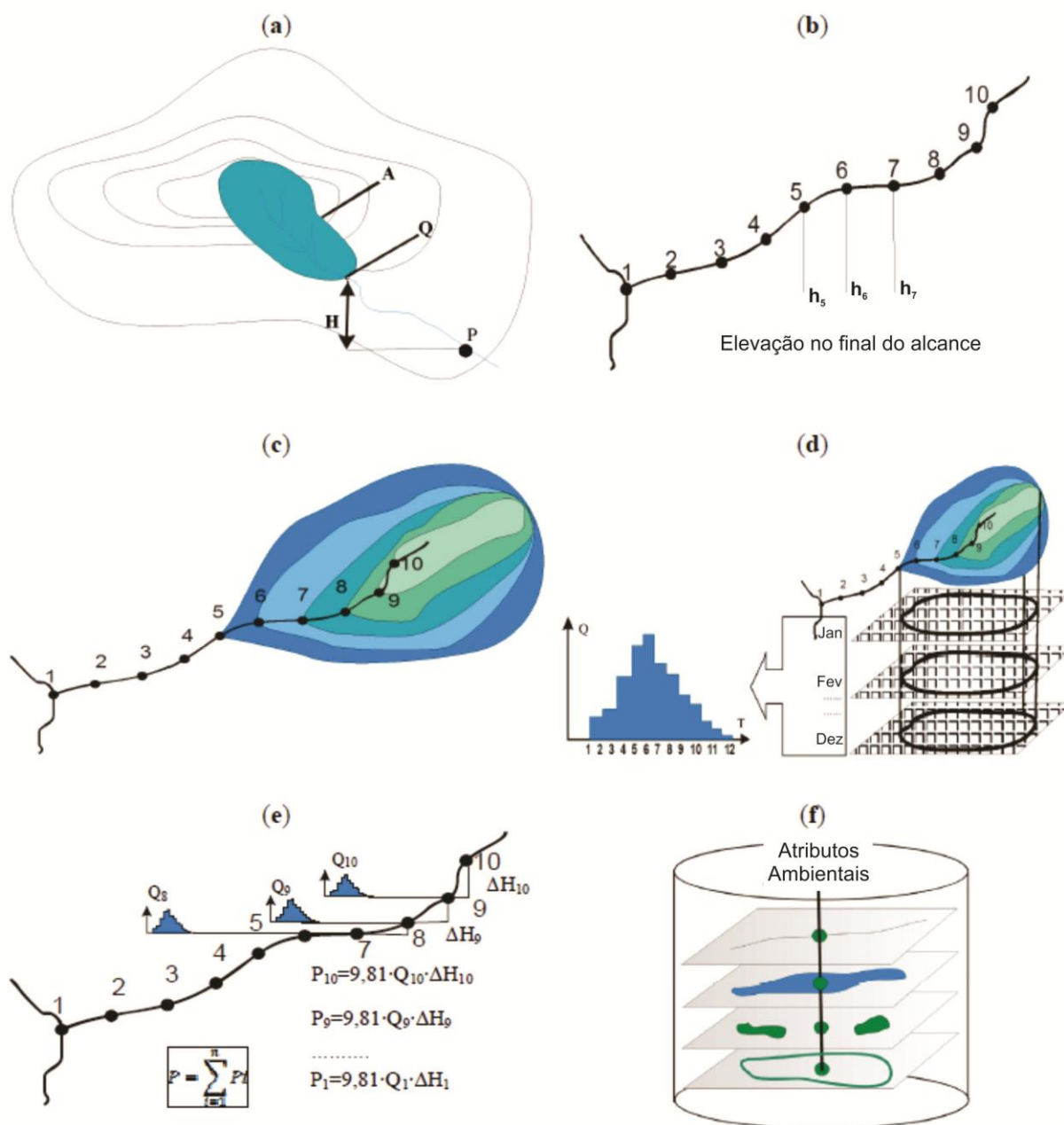


Figura 2.13. Esquema simplificado de aplicação GIS para estimativa de potencial bruto. Fonte: PUNYS (2011).

As pesquisas em países em desenvolvimento indicam a utilização de informações de sensores de RADAR para extração de dados altimétricos em potenciais hidroelétricos em escala de bacia hidrográfica, conforme estudos na Coreia do Sul (YI *et al.*, 2010; SARAF, 2006), Tailândia (ROJANAMON, 2009), Brasil (LARENTIS *et al.*, 2010), América Latina – Bacia do Prata - Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai (CUYA *et al.*, 2013), Índia (RAMACHANDRA e SRINIVAS, 2006).

A utilização de cartas topográficas no Brasil em escalas superiores aos produtos do SRTM não abrange grande parte do território brasileiro. No Brasil trabalhos como o de Rodrigues *et al* (2010) relatam que o mapeamento sistemático brasileiro encontra-se

incompleto na escala 1:25.000 ou maior, onde a maioria dos documentos cartográficos está com aproximadamente 40 anos de desatualização.

2.4.3.1 Sensores de RADAR

Conforme citado em Torres (2007), o Radio Detecting And Ranging - RADAR refere-se a um dispositivo sensor ativo que opera na faixa espectral de rádio ou de microondas. Ele é capaz de detectar os alvos através da indicação da sua posição e distância. Consiste na emissão de pulso de microondas e registro do sinal de retorno. O registro da energia refletida após a interação do sinal com os alvos da superfície terrestre contém duas grandezas distintas: o tempo de retorno e a intensidade do sinal (MOREIRA, 2005).

Um parâmetro utilizado para avaliar a qualidade de uma imagem de RADAR é a sua resolução. O critério mais importante é o tamanho do retângulo do pulso projetado no solo que é similar à célula de resolução terrestre associada aos *scanners* formando os pixels. A resolução espacial em distancia, ou alcance, é dependente de dois fatores fundamentais: a duração do pulso e o ângulo de incidência (CARVALHO, 2005).

Conforme Toutin (1998) existem duas maneiras de obter informações planialtimétricas a partir de imagens de RADAR: estereoscopia e interferometria. A estereoscopia opera de modo parecido ao fotogramétrico chamado de radargramétrico. Entretanto é necessário que as imagens sejam adquiridas do mesmo lado do alvo. Uma vez que a paralaxe impossibilita uma boa estereoscopia em pares tomados por lados opostos (TOUTIN, 1998).

A interferometria utiliza duas imagens da mesma área adquiridas sob ângulos ligeiramente diferentes. Com um processamento complexo é feita a subtração dos sinais gerando um interferograma (TORRES, 2007). Conhecendo a estrutura do sinal e os ângulos de incidência, extrai-se a informação altimétrica dos interferogramas (REIGBER, 2001). Para a interferometria é necessário que haja ao mesmo tempo uma antena emissora e duas receptoras separadas por uma haste (REIGBER, 2001).

Pereira e Menezes (2007), Paradella e Sano (2006), apud in Torres (2007), argumentam que o RADAR é adequado ao processo de geração da informação espacial, sobretudo por sua capacidade de aquisição de dados em quase todas as condições atmosféricas, provando, assim, sua funcionalidade em um número ilimitado de aplicações.

Valeriano *et al.* (2006) estudou interações das ondas eletromagnéticas do sensor de RADAR na Banda C com o dossel da vegetação e os resultados obtidos pelo SRTM para descrição da topografia em bacias hidrográficas com florestas na Amazônia.

2.4.3.1.1 Modelo Digital de Elevação – MDE do SRTM

A National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA)²⁵ foram as instituições responsáveis pela missão SRTM. Os dados de radar foram coletados no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000 (durante 11 dias), a bordo da nave espacial Endeavour. Nesse período, a nave realizou 16 órbitas diárias na Terra, o que correspondeu a 176 órbitas durante toda a missão. O propósito da missão SRTM foi atuar na produção de um Modelo Digital de Elevação (MDE) para todo o planeta. Os dados foram produzidos para a região do planeta posicionada entre os paralelos 56°S e 60°N²⁶.

O método de coleta dos dados do SRTM²⁷ é conhecido como interferometria SAR. Por esse método, duas antenas SAR coletaram dados de radar separadas por um braço extensor de 60 metros e para geração de dados topográficos foi utilizado *software* interferométrico.

Os dados são distribuídos em formato *raster* pelo EROS Data Center, controlado pelo United States Geological Survey (USGS)²⁸ e podem ser acessados em formato HGT, com resolução radiométrica de 16 bits.

O projeto SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) forneceu modelos tridimensionais com qualidade e com duas resoluções espaciais, de 1 arc sec (30 metros) para os Estados Unidos e de 3 arc sec (90 metros) para o restante do mundo, com Datum horizontal WGS84 e Datum vertical WGS84/EGM96. SMITH & SANDWELL (2003) estimaram que a acuidade vertical relativa está na ordem de 5,7 metros em relação ao banco de dados de elevações dos Estados Unidos da América (National Elevation Dataset - NED).

Estudos de avaliação do desempenho do SRTM realizados por Rodriguez *et al.* (2006), realizados com medição em campo, concluíram que 90% da elevação em pontos coletados sobre o território continental da Europa e Ásia resultaram em erros inferiores a 8,7 metros.

2.4.3.2 Estatística Zonal e Focal

Tomlin (1990) desenvolveu uma sequência de processamento para modelagem cartográfica classificadas em quatro tipos: local, focal, incremental e zonal. As ferramentas em estatística focal, ou “focal statistics”, realizam operações de vizinhança em matrizes com operadores de variedade, moda, minoridade, máximo, mínimo, média, aspecto, drenagem, frontagem, gradiente conectividade, agrupamento, área e volume. Conceitualmente, na execução, o algoritmo visita cada célula na matriz e

²⁵ UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso em: 15/8/2013.

²⁶ <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/srtm.htm>.

²⁷ NASA. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>>. Acesso em: 15/8/2013.

²⁸ Sítio da USGS para SRTM: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM2>

calcula a específica estatística na vizinhança. As máscaras de convolução são parametrizadas por número de células ou distâncias²⁹.

Aplicações em modelagem de mapas potenciais e aplicações de geoprocessamento com uso de estatística focal em estudos ambientais aplicados a grandes empreendimentos foram desenvolvidos por Soares-Filho (1998a), Soares-Filho (1998b) e Soares-Filho (1999).

Faria Filho (2007) utilizou a ferramenta “focal máximo” do aplicativo ArcGIS para avaliar potenciais hidroelétricos. Na aplicação, as células do modelo digital de elevação posicionadas na rede hidrográfica foram operadas de forma iterativa pelo algoritmo “focal máximo”. O processo identificou os valores de quedas de água entre o centro da célula analisada e o centro da célula localizada a uma distância horizontal pré-definida de 40 metros a 56,5 metros a montante do mesmo.

No estudo de Faria Filho (2007) o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente foi gerado de cartas topográficas, pontos cotados e rede hidrográfica em escala 1:50.000 com curvas de nível equidistantes de 20 metros. As células tinham resoluções espaciais de 5 metros e 10 metros. O MDE SRTM foi também utilizado para avaliação de quedas d’água. Os resultados para identificação de quedas maiores que 9 metros mostraram-se satisfatórios.

2.4.3.3 Aplicação de estudos geomorfológicos para eixos barráveis

Rennó et al. (2008) desenvolveram um algoritmo chamado HAND (Height Above the Nearest Drainage) ou distância vertical à drenagem mais próxima, baseado nos dados do MDE SRTM. Essa variável descreve a distância vertical de cada ponto referente à drenagem mais próxima e pode ser detectada remotamente através da topografia da cobertura vegetal. O algoritmo considera o fluxo unidirecional para determinar o caminho preferencial da água no terreno até a drenagem mais próxima. Por ser um algoritmo para operar com imagens matriciais, podem ser utilizados outros MDEs com resoluções diferentes que o MDE SRTM.

O algoritmo HAND foi inicialmente concebido para predizer propriedades do potencial hidrológico em cada ponto na grade matricial do MDE SRTM. O algoritmo foi testado como descritor de água subterrânea, topografia e vegetação para uma área de estudo na Amazônia Central. A diferença de energia potencial entre um dado ponto na grade e a outra extremidade na grade de caminho da vazão mais a jusante, na saída do canal de drenagem, define uma única e permanente propriedade nessa grade que foi chamada de “drenagem potencial” (RENNÓ, 2008).

Conforme Rennó (2008), a determinação do fluxo de direção foi implementada no algoritmo pelo método D8 (oito fluxos de direções), inicialmente proposto por O'Callaghan e Mark (1984). Nesse método o fluxo de cada ponto da grade é atribuído a um dos oito vizinhos mais próximos, através da mais íngreme declividade. O processo

²⁹ Sítio da ESRI: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000qs000000> acessado em 15/8/2013.

gera uma matriz denominada LDD (Local Drain Directions) cujos valores associam cada ponto da grade com a direção do fluxo até a saída do canal de drenagem.

Rennó *et al.* (2008) afirmam que o significado real do LDD depende da qualidade do MDE devido o nível da interação das micro-ondas com o dossel da vegetação. No processo tanto as áreas planas quanto sumidouros (sinks) são eliminados utilizando um processo similar de correção do MDE proposto por O'Callaghan e Mark (1984), Band (1986) e Jenson e Domingue (1988). O processo de correção do MDE (MARTZ e GARBRECHT, 1999) para receber informações da hidrologia no ambiente SIG é chamado de “queima” do MDE (“*burn*”).

Segundo Nobre *et al.* (2011) “o modelo HAND e mapas derivados de solos podem ajudar a avanços em modelos hidrológicos orientados fisicamente com foco na composição do solo e dinâmica da água”. Não foram localizadas pesquisas aplicadas em potenciais hidroelétricos. A distância vertical à drenagem mais próxima fornece uma “propriedade hidrológica de potenciais gravitacionais de drenagem” (RENNÓ, 2008). Supõem-se que mapas matriciais de HAND podem ser aplicados aos estudos de localização de sítios com favorabilidade a barramentos para acumulação de energia potencial da água.

O produto HAND em dados matriciais publicados na rede WEB está no banco de dados de Variáveis Ambientais para Modelagem de Distribuição de Espécies – AMBDATA, do Grupo de Modelagem para Estudos da Biodiversidade, na Divisão de Processamento de Imagens do INPE³⁰ (Figura 2.14). Foram processados o MDE SRTM em três limiares (50, 100 e 500 pixels), sendo os valores expressos em metros para todo o Brasil. O algoritmo³¹ HAND para o cálculo da distância vertical à drenagem mais próxima foi implementado na linguagem IDL e utiliza funções do software ENVI 4.7.

A variável de distância vertical à drenagem mais próxima (HAND) proposta por Rennó *et al.* (2008) foi inicialmente estudada para relacionar indiretamente a topografia com a profundidade do lençol freático em áreas da Amazônia, que por sua vez, indica a disponibilidade da água do solo.

³⁰ Distância Vertical à Drenagem – HAND. DPI/INPE, localizado em <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/hand.php>, acessado em 16/8/2013.

³¹ Essa implementação encontra-se disponível em <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/hand>.

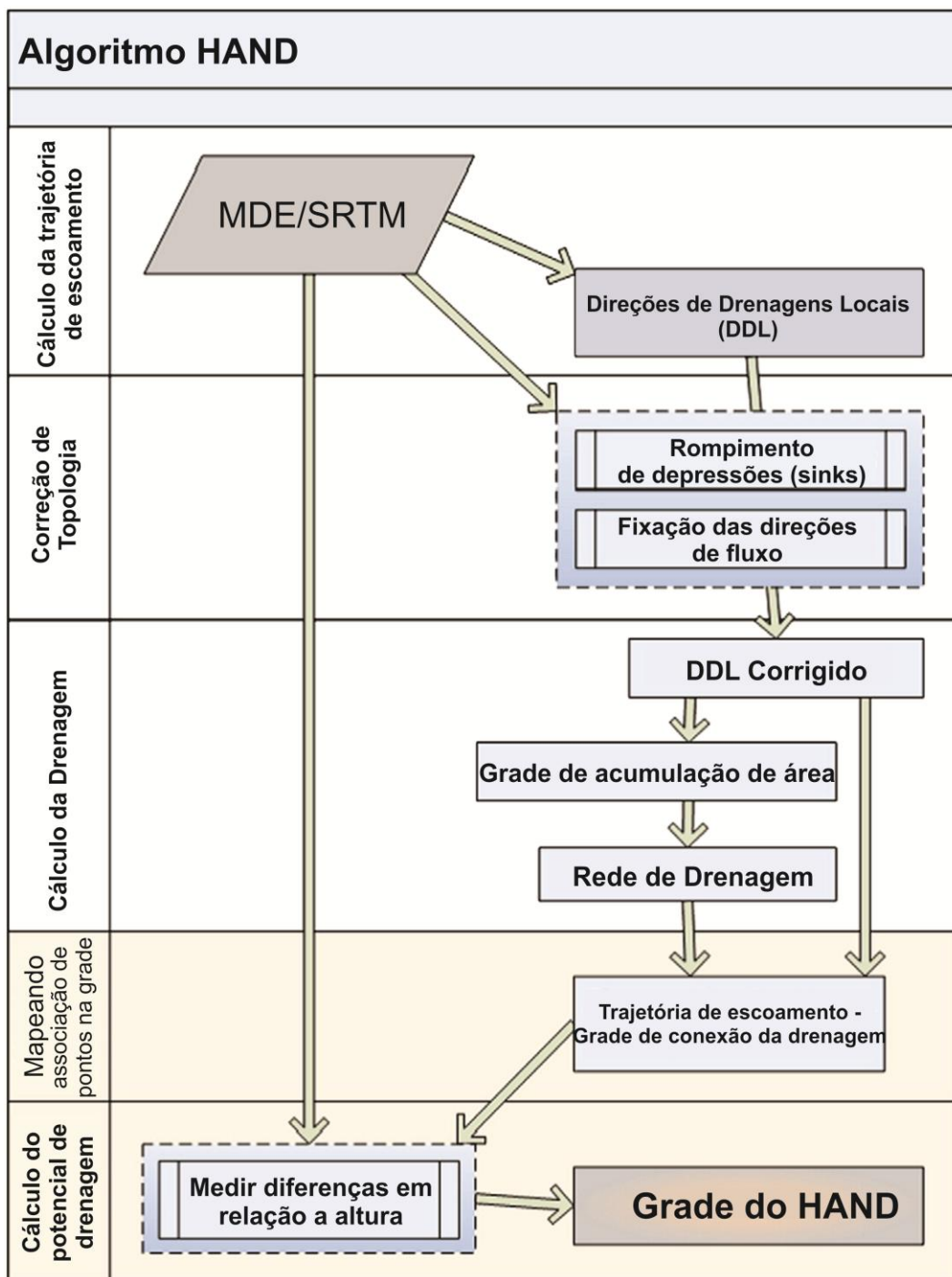


Figura 2.14. Esquema do processamento do algoritmo HAND. Fonte: Rennó *et al.* (2008).

Outras abordagens do HAND foram utilizadas para estudos de vulnerabilidade a deslizamentos de taludes devido à ocupação antrópica em encostas e seus riscos potenciais³². Não foram encontrados estudos sobre a aplicação do HAND em levantamentos de sítios com favorabilidade a construção de barramentos em rios.

³² Esses cenários constam do relatório “Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo” e se referem a projeções climáticas para os próximos 20 anos e cenários futuros entre 2070 e 2100 para a região. Nesse estudo o modelo HAND contribuiu para identificar as possíveis áreas que seriam ocupadas no futuro e o risco potencial, caso o padrão de uso e ocupação do solo atual se perpetue sem nenhuma alteração e controle. Disponível em http://www.issonaoenormal.com.br/CLIMA_SP_FINAL.pdf, acessado em 3/9/2013.

2.4.4 Integração de dados aplicado ao Potencial Hidroelétrico

Conforme Punys *et al.* (2011) um número cada vez maior de países (ex. Canadá, Itália, Noruega, Escócia, USA etc) têm reavaliado seus potenciais hidroelétricos aplicando-se integração de informações espaciais utilizando-se de SIG para automatizar a identificação de sítios. Para os autores, “avaliações confiáveis de reais sítios viáveis de PCH implicam em levantamento em campo, mas essas avaliações tradicionais podem ser grandemente facilitadas utilizando técnicas SIG que envolvem características de captura da variabilidade espacial” para o nível de Prospecção/Estimativa e de Inventário.

Estas ferramentas tem agilizado e aumentado a confiabilidade para estudos preliminares, como em Ávila *et al.* (2003) e Hall *et al.* (2004). Os métodos de levantamento de potenciais hidroelétricos variam entre modelos determinísticos, com simulações de processos hidrológicos realizados por Larentis *et al.* (2010), YI *et al.* (2010), e modelos não determinísticos, probabilísticos ou estocásticos, Rojanamon (2009) e ConnoLy (2010). Estes autores utilizaram análises por múltiplos critérios, incluindo sempre a consideração conjunta de fatores ambientais e socioeconômicos.

Outros métodos também podem ser empregados para a caracterização do potencial hidroelétrico, como por exemplo os empregados para a modelagem ambiental. Estes sistemas de avaliação de impactos ambientais foram classificados por Bolea (1984) da seguinte forma: Sistemas de Redes e Gráficos; Sistemas Cartográficos; Modelagem e Análises de Sistemas; Métodos Baseados em Indicadores e Integração da Avaliação; Métodos Quantitativos. Outro método também passível de ser aplicado é a abordagem orientada por objetivos. Souza (2000) empregou-a para a Avaliação dos Impactos Ambientais em empreendimentos hidroelétricos, utilizando o modelo SUPEROLADE, da Organização Latino-Americana de Energia (OLADE). Esta abordagem orientada por objetivos utiliza metodologia de Dinâmica de Sistemas (Modelagem e Análises de Sistemas) utilizando solução ótima para maximização de objetivos.

Neste contexto, verifica-se, portanto, a tendência das pesquisas sobre potenciais hidroelétricos aplicarem ferramentas de geoprocessamento associados aos sistemas de suporte à decisão³³, conhecidos como Sistemas de Apoio à Decisão – SAD ou Decision Support Systems - DSS.

³³ *Sistemas de apoio à decisão* é uma classe de Sistemas de Informação ou Sistemas baseados em Conhecimento. Refere-se simplesmente a um modelo genérico de tomada de decisão que analisa um grande número de variáveis para que seja possível o posicionamento a uma determinada questão. Decisão é uma escolha entre as alternativas existentes através de estimativas dos pesos destas alternativas. Finlay (1994) e outros autores definem o SAD de um modo geral como “um sistema computacional que auxilia o processo de tomada de decisão”. Turban (1995) define mais especificamente como “um interativo, flexível e adaptável sistema de informação, especialmente desenvolvido para apoiar a solução de um problema gerencial não estruturado para aperfeiçoar a tomada de decisão, utiliza dados, provê uma interface amigável e permite ao tomador de decisão ter sua própria percepção”. Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suporte_%C3%A0_decis%C3%A3o.

Sistema de apoio à decisão é uma classe de Sistema de Informação. Conforme Keen (1980) e Power (1997) não há uma definição universal de sistemas de apoio à decisão, devido à existência de muitos sistemas que dão apoio a decisão. Existem diversas taxonomias aceitas de SAD. Usando o relacionamento com o usuário como um critério, Hättenschwiller (1999) diferencia como SAD passivo, ativo, e cooperativo.

Um SAD passivo é um sistema que auxilia o processo de tomada de decisão, mas não traz explicitamente sugestões ou soluções. Um SAD ativo traz sugestões ou soluções para o problema apresentado. Um SAD cooperativo apresenta para o tomador de decisão (que atua como um conselheiro) as opções de modificar, completar, ou refinar as sugestões apresentadas por outros colaboradores, para que estas sugestões sejam validadas. O sistema realizará a validação das sugestões até que uma solução consolidada seja gerada.

Usando o modo de assistência como critério, Power (2002) classifica em communication-driven DSS, data-driven DSS, document-driven DSS, knowledge-driven DSS, e model-driven DSS.

- Um SAD model-driven enfatiza o acesso e manipulação estatístico, financeiro, otimizado, ou modelo de simulação. Utilizam-se dados e parâmetros providos pelos usuários para assistir a tomada de decisão analisando uma situação; não há necessidade de grande volume de dados.
- Um SAD communication-driven auxilia mais de uma pessoa trabalhando em tarefas compartilhadas;
- Um SAD data-driven gerencia, recupera e manipula informações não-estruturadas em uma variedade de formatos de armazenamento.
- Um SAD knowledge-driven provê especialização na solução do problema através de conhecimentos armazenados como fatos, regras, procedimentos ou estruturas similares;
- Um SAD tradeoff-driven é um sistema de apoio à decisão (possivelmente colaborativo) que provê a tomada de decisão envolvendo trade-offs entre diferentes vantagens e desvantagens, usando o conhecimento armazenado. Usando o escopo como critério, Power (1997) classifica como SAD Empresarial e SAD Desktop. Um SAD Empresarial é ligado a um grande data warehouse e servidores de muitos gerentes em uma companhia. Um SAD Desktop é um sistema pequeno que roda para um gerente em um PC.

Portanto, dentro da taxonomia adotada por Power (2002) a aplicação de sistemas de informações aplicadas ao potencial hidroelétrico tem forte ênfase ao Sistema de Suporte a Decisão orientada ao conhecimento (SAD *knowledge-driven*) no qual se utilizam, algumas vezes de forma desacoplada, Sistemas de Informações Geográficas e Análises Multicritério para apoio à decisão. Verifica-se pela taxonomia de Hättenschwiller (1999) que os sistemas de informação para suporte a decisão sobre o Potencial Hidroelétrico possuem características de "SAD cooperativo" para a análise de favorabilidade, pelo motivo de cooperar - mas não determinar - na escolha do empreendimento, o que diferencia o uso de "SAD data-driven". Os fatores

determinantes são a priorização técnica e a confrontação com interesses socioeconômicos, legais e ambientais.

Hättenschwiler (1999) identifica cinco componentes de um SAD:

- Usuários com diferentes regras de negócio e funções no processo de tomada de decisão;
- Um específico e definido contexto de decisão;
- Um sistema objetivo descrevendo as preferências principais;
- Uma base de conhecimento que é composta de informações, base de conhecimento, programas administrativos e sistemas geradores de relatórios;
- Um trabalho de preparação do ambiente, análise e documentação das alternativas de decisão.

No que tange a aplicação de sistema de suporte a decisão em projetos hidroelétricos, verifica-se sua aceitação em virtude das escolhas de aproveitamento hidroelétrico fortemente relacionarem-se às políticas públicas de energia, que necessitam ser confrontadas com sustentabilidade geoambiental e desenvolvimento da sociedade.

Larentis (2009) utilizando o algoritmo “Hydrospot” verificou que o problema de prospecção de potenciais hidroelétricos e seleção de sítios potenciais, na escala de bacia, não deve ser abordado por otimização, mas sim a partir da escolha dirigida por alguns critérios de preferência, adicionando ao sistema uma metodologia baseada em apoio à decisão por múltiplos critérios.

2.4.5 Análise Multicritério

2.4.5.1 Reconhecimento da Análise multicritério e aplicações

Em aplicações de formulação de políticas públicas e decisões governamentais, comunidades e governos locais têm incentivado a aplicação por análises multicritério (MCA), no sentido de complementar as tradicionais análises custo-benefício (B/C) largamente utilizadas. As técnicas B/C têm sido propostas no Livro Verde (“Green Book”) do documento para apreciação e avaliação de programas do Governo Central Britânico. O Departamento Ambiental, Transporte e das Regiões do Reino Unido elaborou o Manual de Análise Multicritério (Multi-criteria analysis: a manual, 2009) para orientar os tomadores de decisão a aplicarem técnica de MCA desde a priorização programas governamentais à seleção única de projetos. O manual trata de apresentação de técnicas que não necessariamente têm fundamentos em análises monetárias para decisões públicas e apresenta estudos de caso com uso de MCA. Na Comunidade Europeia artigos e livros foram elaborados sobre as aplicações para o aperfeiçoamento das práticas governamentais no Reino Unido por meio de métodos de análise multicritério (BELTON, 1993; BELTON, 1997; BEINAT e NIJKAMP, 1998; DETR, 1998; BANA E COSTA *et al.*, 2000; GREGORY, 2000).

A proposta do manual para a organização dos objetivos, metas e dos critérios para investimentos em transportes é baseada em uma árvore de valores estruturados

inicialmente por Custo e Benefícios, onde os benefícios envolvem aspectos ambientais, de segurança, econômicos (não necessariamente monetários) e acessibilidade. Essa forma de estruturar a MCA, descrita na Figura 2.15 pode ser útil pela similaridade ou a uniformidade dos critérios superiores, que são aplicáveis a outros programas de largo alcance de Governos, como é o caso de escolha de matriz energética ou investimentos em grandes usinas hidroelétricas (UHE) com impacto nacional.

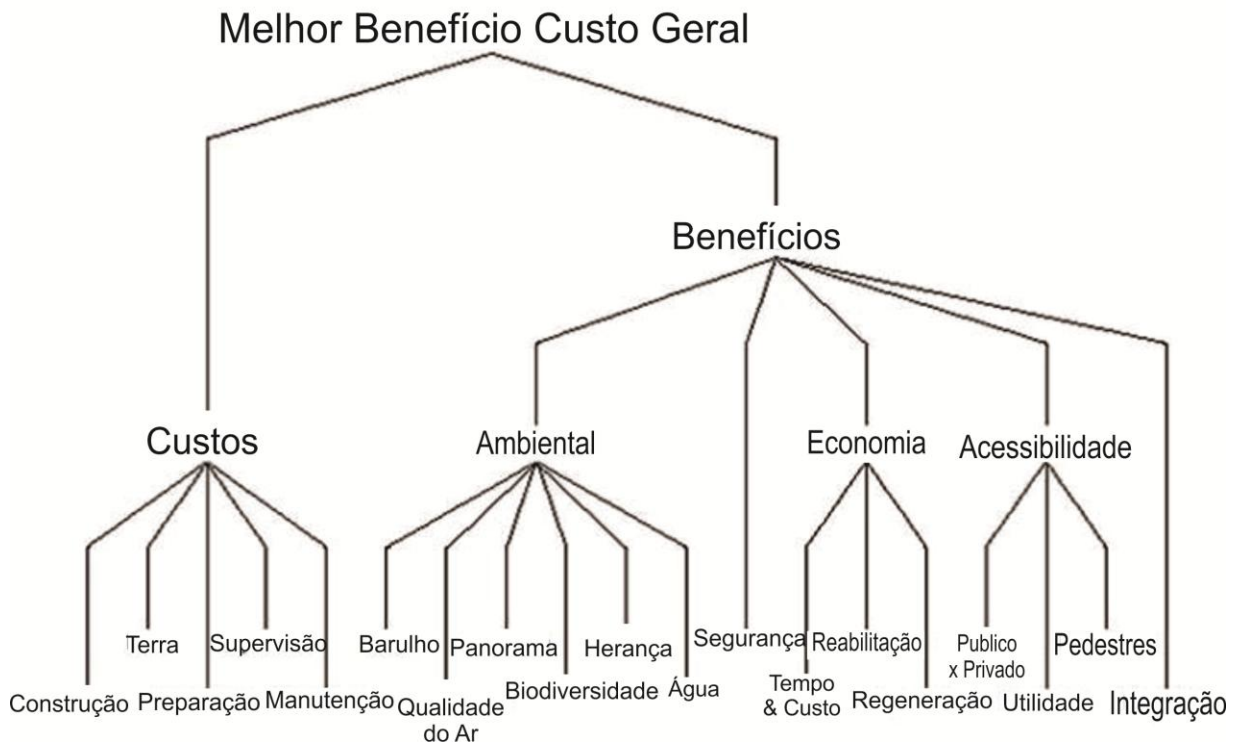


Figura 2.15. Exemplo de objetivos e critérios para uma nova abordagem de apreciação em investimentos em transportes pelo setor público. Fonte: Multi-criteria analysis: A Manual (2009).

Os critérios são agrupados desde os objetivos de alto nível até os critérios relacionados aos objetivos de baixo nível em uma hierarquia. Conforme publicado em Multi-criteria Analysis: A Manual (2009), outros aspectos relevantes da aplicação de métodos de análise multicritério são a possibilidade de acomodar incertezas de uma forma coerente, identificação de riscos e a exploração das visões dos intervenientes dos projetos (“*stakeholders*”).

2.4.5.2 Método AHP

Segundo Ishizaka (2009), o método analítico hierárquico denominado Analytic Hierarchy Process (AHP) é um dos métodos de tomada de decisão multicritério, (*multi-criteria decision making* - MCDM) ou análise multicritério (*multi-criteria analysis* - MCA), que ajuda o tomador de decisão no tratamento de problemas complexos com múltiplos conflitos e critérios subjetivos (por exemplo, alocação ou seleção de investimentos, *ranking* de projetos e outros). Existem diversas aplicações bem sucedidas de AHP para áreas de energia (KOWALSKI *et al.*, 2008; SUPRIYASILP *et al.*, 2009; YUNG-CHI SHEN *et al.*, 2010; DAIM e COWAN, 2010; CHATZIMOURATIDIS e PILAVACHI, 2012; VUCIJAK *et al.*, 2013), hidrologia em reservatórios (YANG *et al.*, 2010) e SIG (CARVER, 1991; JANKOWSKI, 1995; ZAMBON *et al.* 2005; XIONG YING *et al.*, 2007). As mais antigas referências ao método AHP são atribuídas a Saaty (1972) em estudo de racionamento de energia para indústrias.

Conforme Herva e Roca (2013) existem outros métodos de análise multicritério para aplicações testadas em avaliações ambientais, avaliação de ciclo de vida de projetos, sustentabilidade e impactos ambientais, tomada de decisões em energia entre outros. Os pesquisadores realizaram uma revisão dos métodos e suas classificações e identificaram os propósitos da integração entre as diversas técnicas disponíveis. Entre os métodos abordados na pesquisa estão o AHP, MacBeth, ELECTRE e PROMETHEE, descritos da Figura 2.16. Para avaliar os métodos o autor aplicou indicadores econômicos, sociais e ambientais, representativos em diferentes categorias, orientando-se por pesquisas anteriores de Herva *et al.*(2011).

De acordo com a Figura 2.16 verifica-se que as características do método *Analytic Hierarchy Process* – AHP são: aplicáveis a suporte de decisão em estudos ambientais, métodos compensatórios (RIDDER, 2004), pertencente à escola norte-americana, métodos comparativos por pares na escolha dos pesos (em níveis de hierarquia). É comum adotar nível de classificação conforme escala Saaty de 1 a 9 (SAATY, 2005). Conforme classificação Pohekar e Ramachandran (2004) a AHP é um método determinístico, e os dados utilizados podem ser quantitativos, qualitativos ou misto.

Uma característica marcante do método AHP é a classificação adotada por alguns autores (POHEKAR e RAMACHANDRAN, 2004; SADOK *et al.*, 2008; BUCHHOLZ *et al.*, 2009) como método de utilização por múltiplos atributos (*Multi-Attribute Utility* - MAUT), o que o difere de outros métodos denominados por multi-objetivos (*Multiple-Objective Decision-Making* - MODM). Em análises AHP, o problema é estruturado em hierarquia de diferentes níveis constituindo-se em meta, critério, subcritério e alternativas. A decisão por pesos par a par em uma hierarquia de critérios consiste em facilitar ponderações diante de questões multidisciplinares, complexas, e, decidido entre os intervenientes do projeto com visões e interesses diferentes.

Da mesma forma dos outros métodos MCDM tais como ELECTRE, MacBeth, SMART, PROMETHEE (BELTON e STEWART, 2002; FIGUEIRA *et al.*, 2005), o método AHP é

baseado em quatro passos principais: modelagem do problema, avaliação por pesos, agregação dos pesos e análise de sensibilidade.

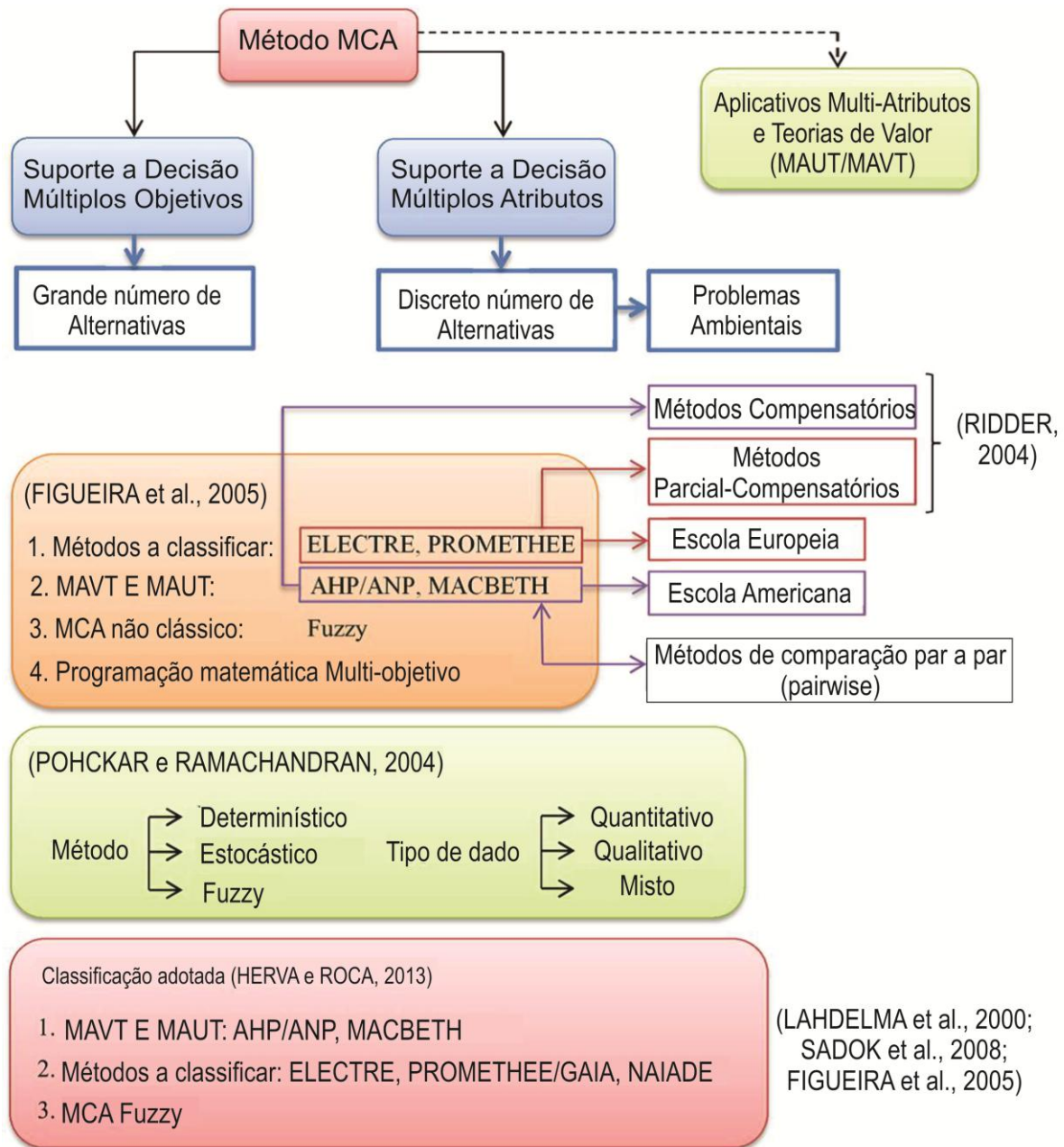


Figura 2.16. Esquema da diversidade de classificações de métodos de análise multicritério (Multi-Criteria Analysis - MCA Methods). Fonte: Herva e Roca (2013).

O método AHP proposto por Saaty (1972) foi posteriormente desenvolvido em aplicativos por outros autores. O aplicativo “Expert Choice” da Expert Choice INC³⁴. é um software para tomada de decisão baseado em métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM), criado por Thomas Saaty e Ernest Forman, avaliados em French e Xu (2005) e Ishizaka e Labib (2009).

Entre as limitações do método AHP está a forma de estruturar o problema e estabelecer objetivos e critérios. Autores consideram essa etapa importante porque

³⁴Disponível em <http://expertchoice.com/>. Acessado em 26/9/2013.

diferentes estruturas podem conduzir a resultados diferentes. Autores (STILLWELL *et al.*, 1987; WEBER *et al.*, 1988) têm observado que critérios com um largo número de sub-critérios tendem a receber mais peso que aqueles que são menos detalhados. Brugha (2004) elaborou um guia completo para estruturar problemas de forma hierárquica.

2.4.6 SIGWEB

Outra abordagem utilizando-se os Sistemas de Informações Geográficas são aplicações de disseminação e disponibilização dos dados de potencial hidroelétrico. Punys *et al.* (2011) identificaram que algumas plataformas SIG utilizadas em escalas nacionais são usadas para disponibilizar dados que foram calculados em sistemas especialistas e apresentam recursos simplificados de análises. O SIG nesse caso é um integrador de informações via Web e as análises podem ser realizadas em módulos integrados ao SIG no servidor ou “stand alone”. Alguns destes sistemas Web são apresentados na tabela 2.9.

Tabela 2.9. Sistemas SIG com Atlas na WEB sobre Potenciais Hidroelétricos

| Nome do SIG / Pesquisa | Desenvolvedor | País aplicado | Acessibilidade |
|--|--|--------------------------|--|
| NVE Atlas. Potential for SHP plants ¹ | Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) | Noruega | Acesso aberto, interativo e mapas na WEB |
| Virtual Hydropower Prospector (VHP) ² | Idaho National Laboratory | USA | Acesso aberto, interativo e mapas na WEB |
| RHAM ³ | Kerr Wood Leidal Associates Ltd (KWL) | British Columbia, Canada | Acesso aberto, interativo e mapas na WEB |
| Hydrobot ⁴ | Nick Forrest Associates Ltd. <i>et al.</i> | Escócia | Acesso limitado |
| VAPIDRO ASTE ⁵ | ERSE SpA, | Itália | Acesso aberto, interativo e mapas na WEB |

¹ NVE Atlas: Potential Sites for Small Hydropower. Disponível online: <http://atlas.nve.no/ge/Viewer.aspx?Site=NVEAtlas>. Acesso em 16/8/2013.

² Virtual Hydropower Prospector (VHP). Disponível online: <http://hydropower.inel.gov/prospector/index.shtml>. Acesso em 16/8/2013.

³ Kerr Wood Leidal Associates Limited. *Rapid Hydro Assessment Model (RHAM)*. Disponível online: <http://www.rapidhydro.ca/>. Acesso em 16/8/2013.

⁴ Hydrobot. Disponível online: <http://www.nickforrestassoc.co.uk/tilemap.php>. Acesso em 16/8/2013.

⁵ *Strategies to Promote Small Scale Hydro Electricity Production in Europe (S.M.A.R.T.)*. Disponível em http://www.seehydropower.eu/download_tools/details.php?id=2. Acesso em 16/8/2013. OEL HYDROSYS. *HydroHelp Series of Hydro Design and Cost Programs—a Description with Examples of Program Screens*, Canada, 2008. Disponível online: <http://hydrohelp.ca/eng/home.htm>. Acesso em 16/8/2013.

Um exemplo bem sucedido no Brasil é o produto “Atlas Digital das Águas de Minas Gerais”³⁵ para mapear espacialmente os recursos hídricos superficiais do Estado de Minas Gerais, manter atualizado e disponibilizar na WEB. O sistema está baseado em tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas. O sistema sob o âmbito do programa de pesquisa e desenvolvimento denominado HIDROTEC fruto da parceria institucional entre duas secretarias de Estado e órgãos vinculados: Secretaria de Estado da Agricultura Pecuária e Abastecimento (SEAPA) e a Fundação Rural Mineira (RURALMINAS), a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV). Conta atualmente com 20 anos de geração de dados e informação sobre recursos hídricos e transferência de tecnologia. As informações do Hidrotec estão abertas a consulta, porém, a transferência dos dados vetoriais para aplicação imediata não está implementada.

Outra plataforma SIG de utilização no setor de energia elétrica brasileira é o SIGEL. Conforme a ANEEL, o SIGEL³⁶ – Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico foi concebido com a expectativa de tornar-se um instrumento de referência na busca de informações consistentes, de caráter geral, relativas às atividades fins do setor, tornando disponível, consolidados em um mesmo ambiente computacional, dados e informações disseminadas em vários subsistemas isolados de interesse corporativo, desenvolvidos interna ou externamente. São disponibilizadas na WEB informações georreferenciadas dos segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O sistema SIGEL permite a consulta e obtenção de dados espaciais e atributos em formato de sistemas SIG (ex. “shapefile” da ESRI e “kml” do Google Earth).

Alguns aplicativos em SIG foram desenvolvidos para realizar análises específicas em localização de sítios para prospecção hidroelétrica, desenvolvidos em linguagens em ambiente SIG (ex. Avenue, Python, ModelBuilder, C++) ou em aplicativos independentes (FORTRAN, MatLAB, Minitab, Statistic). Os aplicativos desenvolvidos podem interagir as ferramentas de análises espaciais contidas no ambiente SIG com métodos de integração para suporte a decisão multicritério.

Yi *et al.* (2010) desenvolveram sistema de análise de locação de sítios hidroelétricos, utilizando alguns “scripts” desenvolvidos em Avenue para ArcView 3.x. O método consiste em selecionar locais de pesquisas de potenciais em função de quedas e vazões em planos de informações, aplicar critérios de restrição ambiental por álgebra de mapas, calcular queda natural e volume estimado do reservatório escolhido, avaliar favorabilidades ambientais e selecionar as melhores localizações por prioridades.

No Brasil, Larentis *et al.* (2010) desenvolveu uma série de rotinas em FORTRAN para ler dados matriciais de um MDE e localizar potenciais brutos de hidroeletricidade em

³⁵ Atlas Digital das Águas de Minas Gerais, disponível em <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/apresentacao.html>. Acesso em 16/8/2013.

³⁶ SIGEL ANEEL, disponível em <http://sigel.aneel.gov.br/org/aipim/help/index.html>. Acesso em 16/8/2013.

escala de bacias hidrográficas por meio de complexas aplicações de otimização. O método realiza duas funções principais:

- Levantamentos baseados em vazões de rios, quedas brutas e mapas de zonas de exclusão;
- Seleção das alternativas prioritárias ordenadas por teste do conjunto de potenciais hidroelétricos considerando regularização da vazão e interferências na área de inundação.

Nesse sistema são realizadas análises para derivações em canais de drenagem (curto-circuito) e otimização da vazão por altura de queda em função do volume reservado e da depleção. O produto final são mapas de sítios com hidroeletricidade máxima que podem ser localizados em função da existência de usinas hidroelétricas a fio d'água ou por acumulação.

Também no Brasil, Polizel (2007) propôs um modelo para avaliação da pré-viabilidade de PCHs e usinas eólicas com base em ferramentas de SIG que visa identificar e avaliar os aspectos técnico-econômicos. A avaliação econômica é realizada em ambiente distinto do SIG. A metodologia é baseada em cinco módulos:

Módulo 1: Pré-seleção de áreas prioritárias para estudo;

Módulo 2 : Proposição de projetos em áreas prioritárias;

Módulo 3: Estimativa de custo de rede e conexão elétrica;

Módulo 4: Análise econômica dos projetos propostos;

Módulo 5: Classificação de projetos e análise de sensibilidade.

2.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E VARIÁVEIS

Diversas são as abordagens matemáticas para estimativa do potencial bruto hidroelétrico em escala de bacias hidrográficas em estudos mundiais. As formulações matemáticas pesquisadas baseiam-se nos seguintes aspectos: (i) variáveis utilizáveis conforme qualidade e acurácia de dados e informações disponíveis no Brasil (ii) Implementações factíveis para a extensibilidade do território nacional, orientando-se por dados públicos publicados na WEB, aplicável a todo o território brasileiro. As formulações matemáticas, pesquisadas para determinação das variáveis “vazão”, “altura de queda” e “potência”, foram obtidas de fontes distintas e as nomenclaturas são definidas a seguir.

- Regressão Múltipla: Vazões como variáveis dependentes, variáveis físicas e ambientais como variáveis preditoras.

A regressão regional é extensivamente empregada nos estudos hidrológicos para estudar a relação entre as variáveis e fazer predições de vazões para estimativas de potencia ou energia de potenciais hidroelétricos. Conforme Cyr (2011) usualmente uma regressão ponderada por mínimos quadrados é usada quando estações hidrométricas têm diferentes séries temporais (MARK, 1988). Para a estimativa de vazões anuais médias Cyr (2011) utilizou o modelo de regressão regional baseado em Vogel *et al.*(1997) para todas as áreas de drenagem (ou área de contribuição) do estudo:

$$Q = e^{C_0} \times X_1^{C_1} \times X_2^{C_2} \dots X_n^{C_n} \times e^\varepsilon$$

Onde, Q é a vazão anual observada, ou a vazão média em uma estação hidrométrica, X_i são as várias áreas de drenagem características, C_i são os coeficientes de regressão e ε é o residual do modelo.

Modelos de regressões foram testados por Cyr (2011) para estimar vazão mínima com 95% de permanência (Q_{95}) utilizando como variáveis preditoras (ou independentes) as variáveis físicas (i) área de drenagem, (ii) elevação média, (iii) amplitude da elevação e a variável climática, (iv) precipitação média anual (Canada, Department of Environment, 2009; World Climate, 2005). As combinações das regressões alcançaram correlações superiores a 80%.

- Inequações Lineares: Vazão média de longo período e vazões máximas e mínimas.

Ávila *et al.* (2003) realizaram cálculo de vazão específica na estação Derocal, Rio das Fêmeas, Estado da Bahia. A Estação de Derocal estudada, pertencente à Rede de observação da ANEEL, localiza-se nas coordenadas 12°24'37"S e 045°07'29" W, e tem uma área de contribuição de 6.231 km². Foi aplicada a seguinte equação:

$$Q_e = \frac{Q}{A},$$

Onde: Q_e – Vazão específica; Q – Vazão média anual e A – Área da Bacia de Contribuição (área de drenagem).

Para o cálculo da vazão específica utilizou-se a equação:

$$Q_{ep} = Q_e \times A_p,$$

Onde: Q_{ep} – Vazão específica por *pixel*; Q_e – Vazão específica e A_p – Área por *pixel* em m².

Conforme Ávila *et al.* (2003), é possível o cálculo da vazão média anual, ou vazão média de longo período, quando a informação de vazão específica conhecida em séries históricas de 25 anos é multiplicada pela área de contribuição no local estudado. Os resultados demonstraram a simplicidade de implementação em ambiente SIG e comprovaram a eficiência do método em estudos preliminares.

- Inequação Linear: Energia e Potência hidro energética.

Os conceitos de energia e potência são frequentemente confundidos. Faz-se necessário estabelecer claramente a diferença entre energia e potência antes da formulação matemática. A palavra energia vem do grego $\varepsilon\rho\gamma\sigma$ (ergos), que significa trabalho. Qualquer objeto que desenvolva trabalho está fazendo uso de energia para

tal. Na ciência da Física pode significar o produto de uma força pela distância, considerando a direção em que a força atua. Neste caso, o trabalho pode estar relacionado a uma força de caráter mecânico, magnético, ou de outro tipo. Pode-se afirmar que trabalho é a maneira como se transfere energia a um corpo ou o modo como se imprime ação a um evento (PINHO *et al.*, 2008).

Em Física, potência é a grandeza que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo. Em outros termos, potência é a rapidez com a qual certa quantidade de energia é transformada ou é a rapidez com que o trabalho é realizado³⁷.

As equações de potência, trabalho e energia são as seguintes, apresentadas em Pinho *et al.* (2008):

$$P = \frac{dE}{dt},$$

Sendo P a potência, E a energia e $\frac{dE}{dt}$, a taxa de variação da energia no tempo.

Quando a considerada a variação da energia no tempo transcorrido, a expressão anterior reduz-se a:

$$P = \frac{E}{t},$$

Onde t é o tempo transcorrido e P é a potência constante. Considerando as expressões anteriores pode-se reescrevê-las colocando a energia em função da potência, das seguintes formas respectivamente:

$$E = \int P \times dt, \quad e$$

$$E = P \times t.$$

Portanto, a taxa na qual se converte essa energia é que determina a potência. Quanto maior a potência aplicada, maior é a quantidade de energia utilizada em um mesmo intervalo de tempo (PINHO *et al.*, 2008).

Quanto ao potencial de geração teórico, a Potência Bruta, ou Potência Hidráulica de uma usina é definida como:

$$P_h = \rho \times g \times H_g \times Q/1000,$$

Onde P_h é a Potência Bruta (kW); ρ é densidade do fluido (água = 1000 Kg/m³), g é constante da aceleração da gravidade (9,81 m/s²), H_g é a altura topográfica (m) e Q é a vazão (m³/s). A vazão Q é obtida em função do diferencial da pressão, pode ser medida via equipamento (MARTINEZ *et al.*, 2006).

³⁷ Potência e Energia. Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Pot%C3%Aancia>, acessado em 19/8/2013.

A Potência Elétrica é a Potência Bruta multiplicada por um fator de rendimento da Usina. A Potência Efetiva do Conjunto é a Potência Nominal de cada máquina ou de um determinado conjunto de máquinas da usina. No entanto, de acordo com a altura de queda e com a vazão turbinada, a potência gerada varia dentro de determinados limites (MARTINEZ *et al.*, 2006).

Azevedo *et al.* (2010) utilizaram o conceito de “Potencial Realizável”, no âmbito do Planejamento Integrado de Recursos – PIR³⁸, para referirem-se a continuidade dos estudos do levantamento de um potencial teórico sob as quatro dimensões do potencial de geração hidroelétrico: dimensão técnico-econômica, dimensão ambiental, dimensão social, dimensão política.

A Vazão Efetiva do Conjunto é o turbinamento nominal de cada máquina de um determinado conjunto de máquinas. No entanto, de acordo com o projeto da Usina Hidrelétrica, o turbinamento pode variar dentro de determinados limites (MARTINEZ *et al.*, 2006).

Diante das dificuldades de estimar a “vazão de turbinamento” no estágio de levantamento dos potenciais hidroelétricos alguns autores utilizam a variável “vazão” como a vazão de escoamento no canal de drenagem (ex. YI *et al.*, 2010; CUYA, 2013; CYR *et al.*, 2011).

Yi *et al.* (2010) consideraram que a questão crítica da vazão estável seria estimar a usina em operação, porém, isso implicaria em simular análises de permanência de fluxo, vazões extremas e vazões de longo prazo, em bacias não monitoradas com estações hidrométricas. Para o estudo os autores assumem que as características de precipitação não são geralmente significantes variáveis espaciais e quanto maior a área de contribuição do escoamento naquele ponto, mais estável e mais abundante será a vazão do canal de drenagem. Portanto, o autor determina como variável no estudo do fator hidrológico, somente a vazão média de longo período obtida pela área de contribuição e não utiliza vazões extremas mínimas e máximas.

Cuya *et al.* (2013) utilizou a formulação matemática simplificada para estimativa de energia gerada por um conjunto de potenciais hidroelétricos em uma área de sub-bacias hidrográficas:

$$E_{own_max} = con_v \times g \times \eta \times Q_{up_hyd} \times (H_{mean} - H_{closure})$$

Onde, Q_{up_hyd} é a média anual de descarga no exutório para as bacias a montante. Esse valores são calculados pela interpolação ou extrapolação das vazões observadas, localizadas no canal do principal canal de drenagem;

³⁸ A proposta principal do PIR é a de ser uma alternativa ao modelo tradicional de planejamento energético que é realizada pela combinação de métodos e técnicas de previsão de carga relacionadas com previsões e ofertas para elaboração de cenários de alternativas de recursos de oferta que muitas vezes levam em consideração preferencialmente o custo efetivo de implantação e operação, deixando em segundo plano as questões sob o ponto de vista ambiental e social entre outros (UDAETA, 1997).

H_{mean} é a média de elevação das sub-bacias a montante calculada da curva hipsométrica, usando ferramentas estatísticas do ArcGIS.

$H_{closure}$ é a altura no ponto do exutório das sub-bacias a montante;

As siglas con_v , g e η significam, respectivamente, fatores de conversão, aceleração da gravidade e rendimento média das usinas hidroelétricas, e foram consideradas constantes nos estudos.

Os cálculos realizados por ferramentas e técnicas de SIG, com aplicação do aplicativo robusto VAPIDRO-ASTE, estimaram a energia não explorada na Bacia do Prata, por meio da comparação entre os potenciais existentes e os potenciais não explorados (CUYA *et al.*, 2013).

Larentis *et al.* (2010) utilizou a formulação matemática:

$P_n = Q_T \times H_a \times 8,85$, onde: P_n é o Potencial Bruto médio (kW); H_a é a queda bruta da água (m) e Q_T é a média da descarga passando através das turbinas (m³/s).

A Eletrobrás (2000) no documento “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas”, no Capítulo 4 – “AVALIAÇÃO EXPEDITA DA VIABILIDADE DA USINA NO LOCAL SELECIONADO” adota os termos Energia Firme (EF_e) e Potência Instalada no processo de avaliação da viabilidade.

$$EF_e = \frac{\mu \times 9,81 \times Q \times H_{liq}}{1000} \times \Delta t, \text{ ou}$$

$$EF_e = 0,0083 \times Q \times H_{liq} \text{ (MW médio)}$$

Onde,

EF_e é energia firme estimada em MW médios, considerando-se Q e H_{liq} constantes durante o funcionamento da usina (1 MW médio = 8760 MWh por ano, durante a vida útil da usina);

μ é rendimento do conjunto turbina-gerador, sugerindo-se o valor final de 0,85;

Δt é intervalo de tempo igual a 1 s;

Q é vazão mínima medida no local, ou $Q_{9,5\%}$, ou, ainda, a vazão média (\bar{Q}) ao longo do período crítico do sistema interligado (m³/s);

H_{liq} é queda líquida (m).

A vazão Q para o local deverá ser estimada a partir de dados de postos hidrométricos da bacia/região, conforme metodologia apresentada em Eletrobrás (2000), Capítulo 6: “Estudos Básicos – Hidrológico”.

A queda líquida (H_{liq}) será igual à queda bruta menos as perdas hidráulicas, nesta fase adotada, iguais a 3% para casas de força ao “pé” da barragem e 5% para aduções em túnel/canal.

Como $EF_e = F_c \times P_{ot}$ tem-se, $P_{ot} = \frac{EF_e}{F_c}$

Onde,

P_{ot} é a potência instalada (MW);

F_c é o fator de capacidade, adotado para essa fase, igual a 0,55.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A AVALIAÇÃO DE POTENCIAIS HIDROENERGÉTICOS

3.1 SELEÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DE ESTUDO

Para a escolha da bacia hidrográfica do estudo de caso foram respeitados concomitantemente os seguintes critérios: (i) acessibilidade a dados com qualidade adequada ao estudo do potencial hidroelétrico, (ii) extensibilidade das variáveis estudadas, aplicadas a todo o território nacional na acurácia do estudo e (iii) existência de potenciais hidroelétricos estimados e de aproveitamentos hidroelétricos explorados.

A bacia do rio Doce dispõe de um grande volume de dados hidrológicos em escala de bacia hidrográfica encontrados no "Atlas Digital das Águas de Minas" e gerenciados no âmbito do programa Hidrotec³⁹. Informações socioeconômicas e ambientais da bacia do rio Doce podem ser acessadas na WEB em sítios de informações públicas de instituições que atuam em áreas de meio ambiente e energia (ex. Eletrobrás, ANEEL, EPE, ANA, IBAMA, Governo do Estado de Minas Gerais e universidades). Por ser uma bacia de relevância socioeconômica ao país, pesquisas acadêmicas em áreas de conhecimentos multidisciplinares têm utilizado a bacia do rio Doce como área de estudo (COELHO, 2007a; SOUZA, 2012).

A bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 3.1) está localizada na Região Sudeste do Brasil entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo entre os paralelos 17°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de longitude oeste. Possui uma extensão total de 853 km e uma área de drenagem de 83.465 km² (COELHO, 2007b).

Segundo informações do Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos do **Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM**⁴⁰, a bacia do rio Doce situa-se na região sudeste brasileiro, com 86% de áreas pertencentes ao Estado de Minas Gerais e 14% ao Espírito Santo. A região abrange 230 municípios, sendo 202 em Minas Gerais e 28 no Espírito Santo.

As nascentes dos formadores do rio Doce estão em altitudes superiores a 1.000 m (Serra do Espinhaço e Mantiqueira). O rio Doce segue em altitudes inferiores a 300 m,

³⁹ O programa recebeu apoio do CNPq no biênio 1991/1992, da FAPEMIG em 1996/1998 e do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia legal / Secretaria de Recursos Hídricos em 1997, que o tornou de âmbito nacional enfatizando, especialmente, o treinamento de técnicos, a regionalização de variáveis hidrológicas e o gerenciamento e outorga de água. Em 2002 recebeu apoio da Agência Nacional de Águas - ANA na publicação dos Boletins Técnicos No 5 e 6, versando sobre as sub-bacias do rio São Francisco em Minas Gerais. Os Boletins técnicos de números 6 a 10 foram publicados com recursos financeiros da RURALMINAS. Em 2005 com apoio do IGAM foi publicado a primeira edição do "Atlas Digital das Águas de Minas" (CD-ROM e manual). Em 2007 com recursos do FHIDRO (Fundo de Recuperação Proteção e Desenvolvimento Sustentável das Bacias Hidrográficas do Estado de Minas Gerais) foi publicado, também no formato de CD-ROM, a segunda edição do referido Atlas.

⁴⁰ Pensado como um dos instrumentos de gestão das águas, o Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (SEIRH), foi instituído juntamente com os planos estaduais de recursos hídricos, o enquadramento de cursos d'água, a cobrança pelo uso da água, a compensação aos municípios, a outorga pelo uso da água, em âmbito federal, pela lei 9.433/1997 e, em âmbito estadual, pela lei 13.199/1999. Tem como objetivos principais: coletar, tratar, armazenar, recuperar, disponibilizar e divulgar as informações que subsidiam a gestão dos recursos hídricos.

com extensão de 850 km desde a nascente até o oceano Atlântico, no povoado de Regência-ES⁴¹ (QUEIROGA, 2006).

O Projeto do rio Doce⁴² dividiu a bacia hidrográfica em sete unidades ou regiões em função das bacias hidrográficas dos seus principais afluentes (Tabela 3.1). Para a mesma escala de bacia, na Figura 3.1 são apresentadas as 9 sub-bacias (Ottobacias nível 3) conforme padronização da ANA.

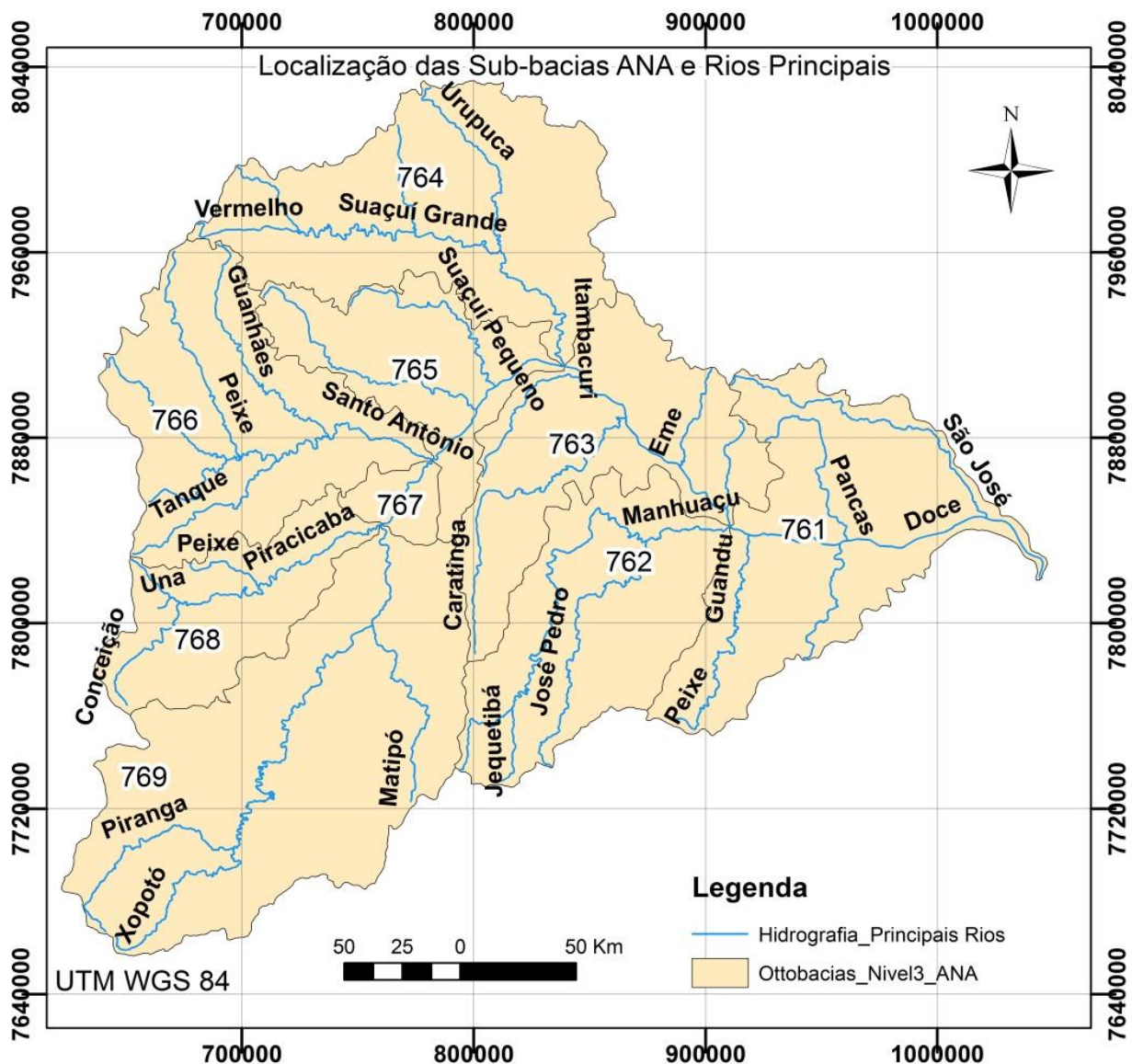


Figura 3.1. Sub-bacias da ANA (Nível 3) e rios principais do HidroWEB.

⁴¹ Informações sobre as bacias hidrográficas, rios afluentes e seus CBH's (comitês de bacias hidrográficas), disponível em <http://cenfopgeografia.files.wordpress.com/2010/02/apostila-bacia-do-doce.pdf>, acessado em 26/8/2013.

⁴² O Projeto Rio Doce teve seu início em 1989 através de um convênio de cooperação técnica entre os governos brasileiro e francês, com o objetivo de subsidiar o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos na bacia baseado no modelo francês. O projeto foi dividido em três etapas distintas: elaboração do diagnóstico da bacia, elaboração de um plano diretor e simulação financeira do funcionamento de uma agência de bacia. Os trabalhos da cooperação foram finalizados em 1993.

Tabela 3.1. Regiões hidrográficas da bacia do rio Doce.

| Região da Sub-bacia | Rio da Sub-bacia | Área (Km ²) |
|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Região Hidrográfica Doce 1 | Rio Piranga | 25.000 |
| Região Hidrográfica Doce 2 | Rio Piracicaba | 5.800 |
| Região Hidrográfica Doce 3 | Rio Santo Antônio | 10.400 |
| Região Hidrográfica Doce 4 | Rio Suaçui Grande | 14.700 |
| Região Hidrográfica Doce 5 | Rio Caratinga | 6.000 |
| Região Hidrográfica Doce 6 | Rio Manhuaçu | 9.370 |
| Região Hidrográfica Doce 7 | Rios do Estado do Espírito Santo | 11.900 |

Fonte: Projeto Águas do Rio Doce⁴³.

Os afluentes do rio Doce pela margem esquerda são os rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande, Suaçui Pequeno, Suaçui Grande, São José e Pancas. Já pela margem direita são os rios Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté, Manhuaçu, Guandu e Santa Joana. Segundo o programa Hidrotec, as vazões médias específicas na bacia são maiores nos afluentes da margem esquerda, nos trechos alto e médio (15 até 35 l/s.km²). Por outro lado, a região com menores vazões médias específicas (5 a 10 l/s.km²) corresponde à bacia do Suaçui Grande.

A precipitação média anual na bacia varia entre 1.600 mm, nas nascentes localizadas nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço, a 900 mm, na região da cidade de Aimorés/MG, voltando a crescer em direção ao litoral. A Figura 3.2 e a Figura 3.3 apresentam respectivamente a precipitação pluvial média anual (mm) e a precipitação média do semestre mais chuvoso (mm) indicando tendências de sazonalidade. Os dados das cartas topográficas são do IBGE – Projeção UTM – Escala 1:250.000, e a digitalização realizada pela equipe técnica do Programa Hidrotec.

⁴³ No período de julho de 1996 a julho de 1998 esteve em funcionamento a Agência Técnica da Bacia do Rio Doce - ADOCE, projeto este de simulação de funcionamento de uma agência de bacia nos moldes da Lei 9433 de janeiro de 1997, que dispõe sobre a Política de Recursos Hídricos no Brasil. O projeto foi desenvolvido pela CPRM/SUREG-BH, financiado e coordenado pela ANEEL. Disponível em <http://www.riodoce.cbh.gov.br/AcervoADOCE.asp>. Acesso em 27/8/2013.

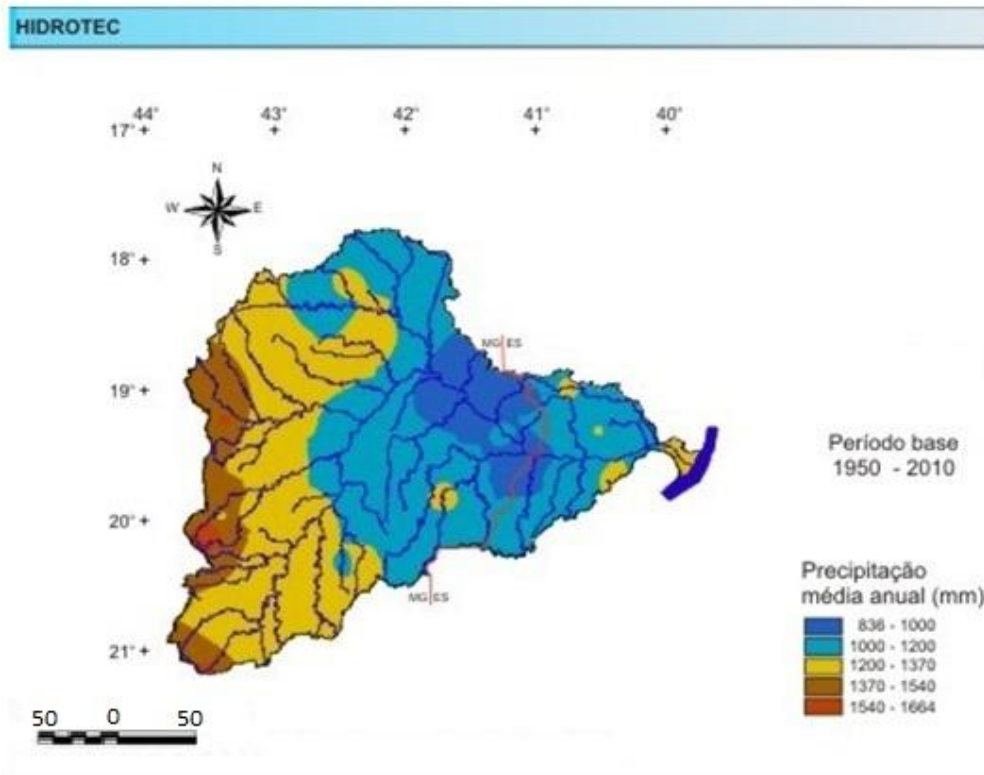


Figura 3.2. Mapa de precipitação média anual (mm/ano). Fonte: Euclides *et al.* (2010).

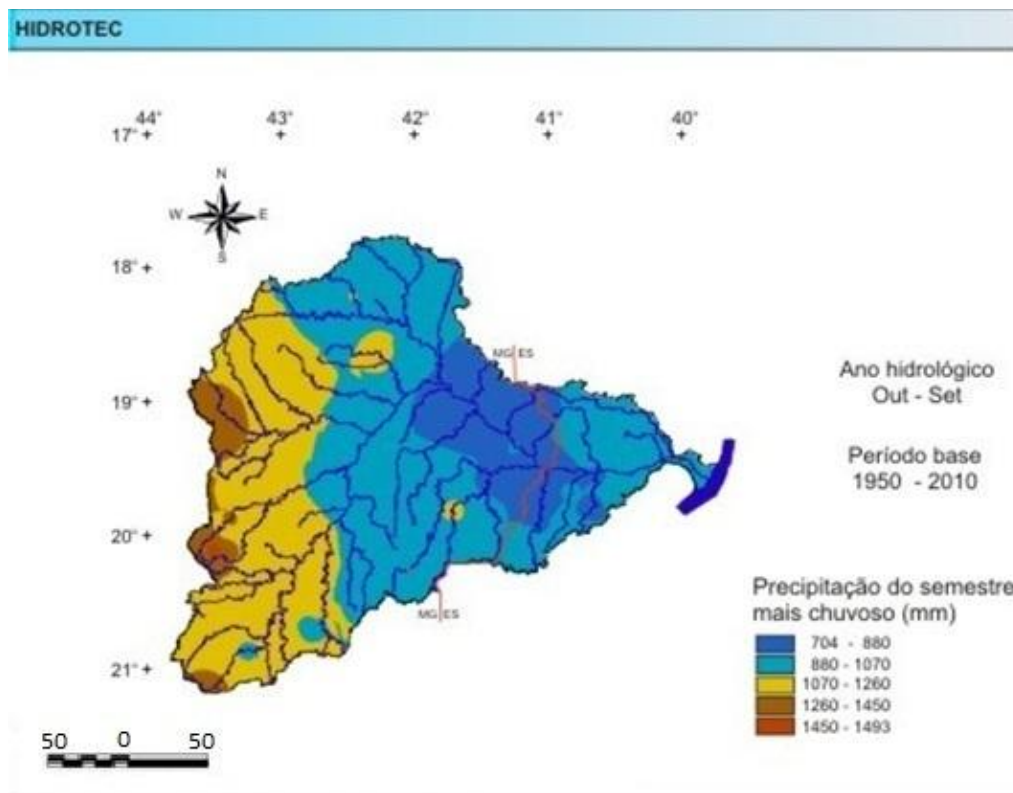


Figura 3.3. Mapa de precipitação do semestre mais chuvoso (mm/ano). Fonte: Euclides *et al.* (2010).

Segundo Queiroga (2006) identificam-se basicamente três tipos climáticos⁴⁴ na bacia: o clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos presente nas vertentes das Serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; o clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, presente nas nascentes dos seus afluentes; e o clima quente com chuvas de verão, presente nos trechos médio e baixo do rio Doce e de seus afluentes. Esses fatores têm relevância sobre o regime hidrológico e a heterogeneidade ambiental da bacia hidrográfica.

O desenvolvimento do Estado de Minas Gerais e dos municípios da bacia do rio Doce tem refletido nas mudanças na infraestrutura de transportes e na exploração da agropecuária e dos recursos minerais (QUEIROGA, 2006). Essas e outras questões socioeconômicas exercem pressão sobre a preservação do meio ambiente. Os impactos resultam em alterações ao regime hidrológico e hidráulico. A região sofre com problemas de inundação, que tem sua origem natural agravada por ações antrópicas. O desmatamento indiscriminado e o manejo inadequado do solo criaram condições favoráveis à formação do processo erosivo, que somado aos despejos inadequados advindos da mineração e de resíduos industriais e domésticos, deram origem ao contínuo processo de assoreamento dos leitos dos rios da bacia e às alterações nos transportes de sedimentos para reservatórios. As instituições públicas brasileiras têm mantido bases de dados de aspectos de uso e ocupação do solo para apoiar escolhas de potenciais hidroelétricos e usos múltiplos.

Sob o aspecto da influência da ocupação do solo no regime hidráulico, verifica-se que algumas cidades na bacia do rio Doce avançaram sobre planícies de inundação dos rios. Essas planícies de inundação são áreas próximas ao leito principal que ocasionalmente são alagadas pelo extravasamento das águas dos rios. De tempos em tempos, eventos chuvosos mais severos provocam o alagamento de parte destas planícies, podendo a área permanecer alagada durante horas, dias ou até mesmo meses.

A amplitude de áreas alagadas está ligada, dentre outros fatores da natureza ou humano, à frequência do evento chuvoso, ou seja, eventos raros (menos frequentes) alagam grandes áreas e eventos mais comuns (mais frequentes) alagam áreas menores (CBH-DOCE, 2006). Na bacia do rio Doce a ocorrência de ações antrópicas de mudanças na infraestrutura urbana e de edificações para o bem estar social (reservatórios, rodovias, ferrovias, aeroportos, pontes e obras de terra) é significativa por influenciar as variáveis de vazões extremas máximas e mínimas no estudo dos potenciais hidroelétricos. Além do conhecimento das variáveis e dos dados hidrológicos e geomorfológicos para o estudo hidroelétrico, os registros públicos das ações antrópicas na bacia do rio Doce, possibilitam, no estágio de prospecção, estudos de potenciais hidroelétricos sobre os impactos da edificação de novos barramentos.

⁴⁴ Disponível em <http://www.ana.gov.br/cbhriodoce/bacia/caracterizacao.asp>. Acesso em 1/11/2013.

3.2 FLUXOS DOS PROCEDIMENTOS

São apresentados os fluxogramas das análises topográficas (Figura 3.4), análises hidrológicas (Figura 3.5), mapa de favorabilidade ao potencial bruto (Figura 3.6) e análises multicritério (Figura 3.7).

Fluxos das análises topográficas por processos de tratamento do MDE, HAND e Estatística Focal e Zonal:

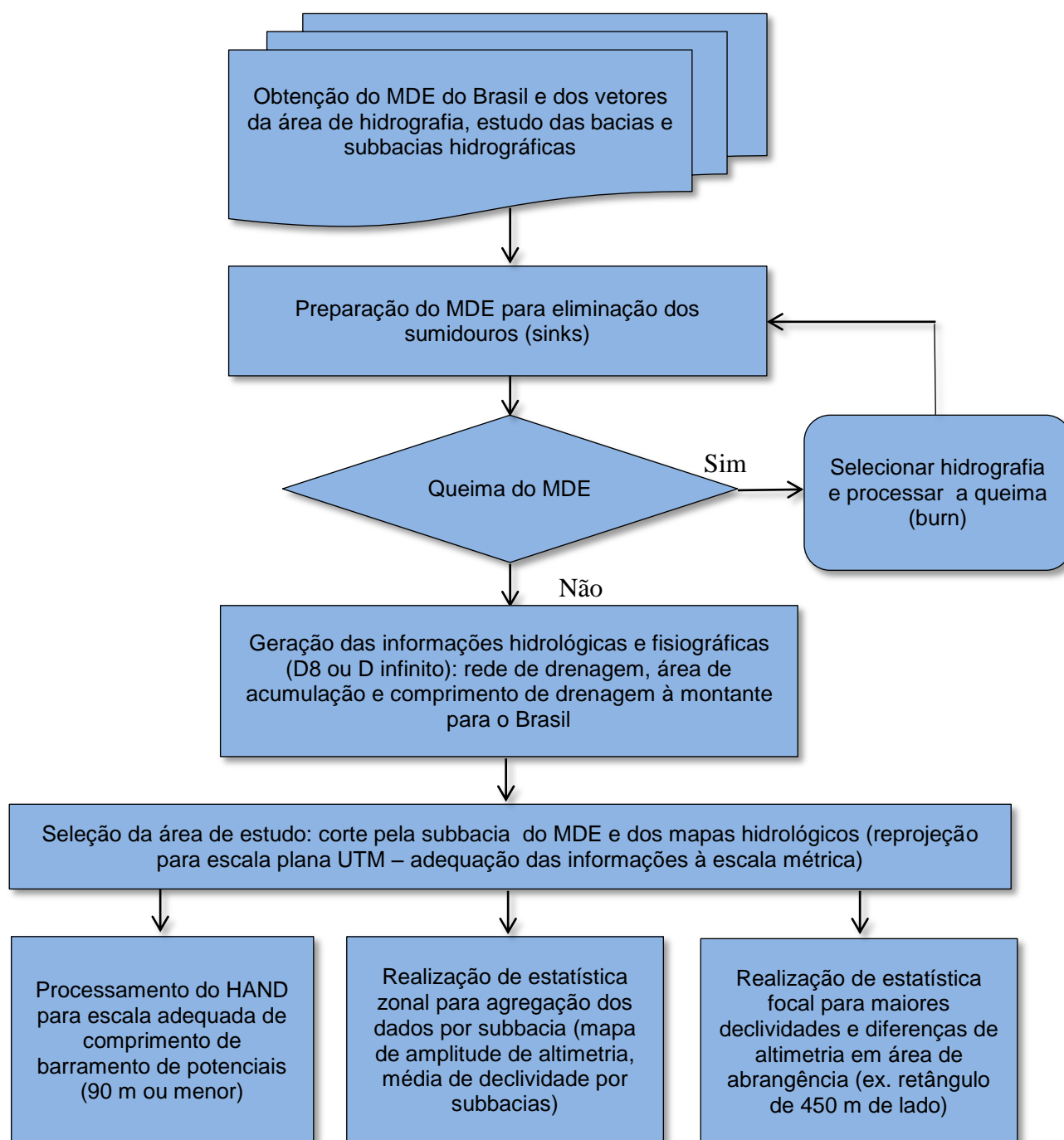


Figura 3.4. Fluxo metodológico dos processos aplicados para análises topográficas.

Fluxos das análises Hidrológicas por processos de regionalização com GWR:

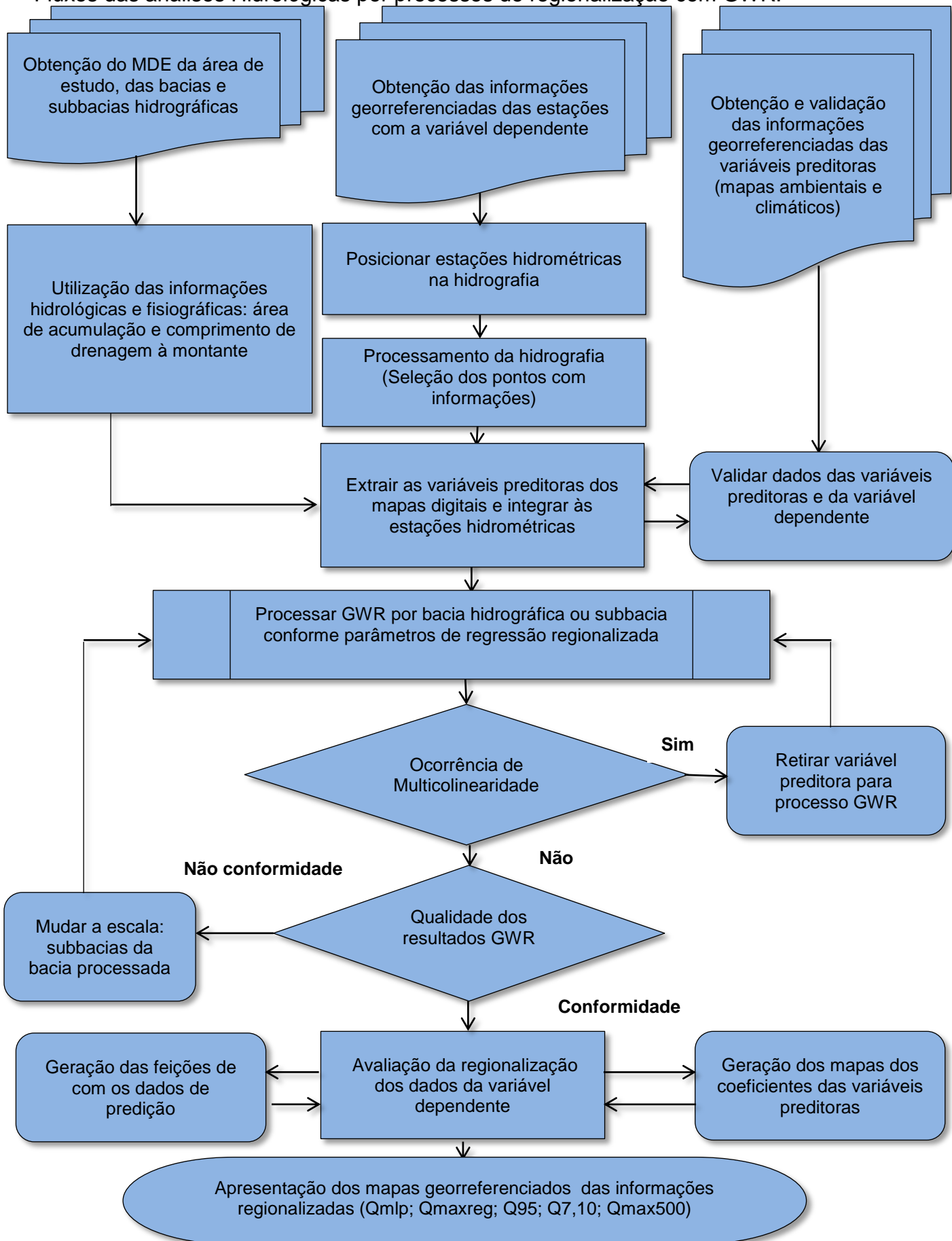


Figura 3.5. Fluxo metodológico dos processos aplicados para análises hidrológicas.

Fluxos do mapa de favorabilidade ao potencial bruto:

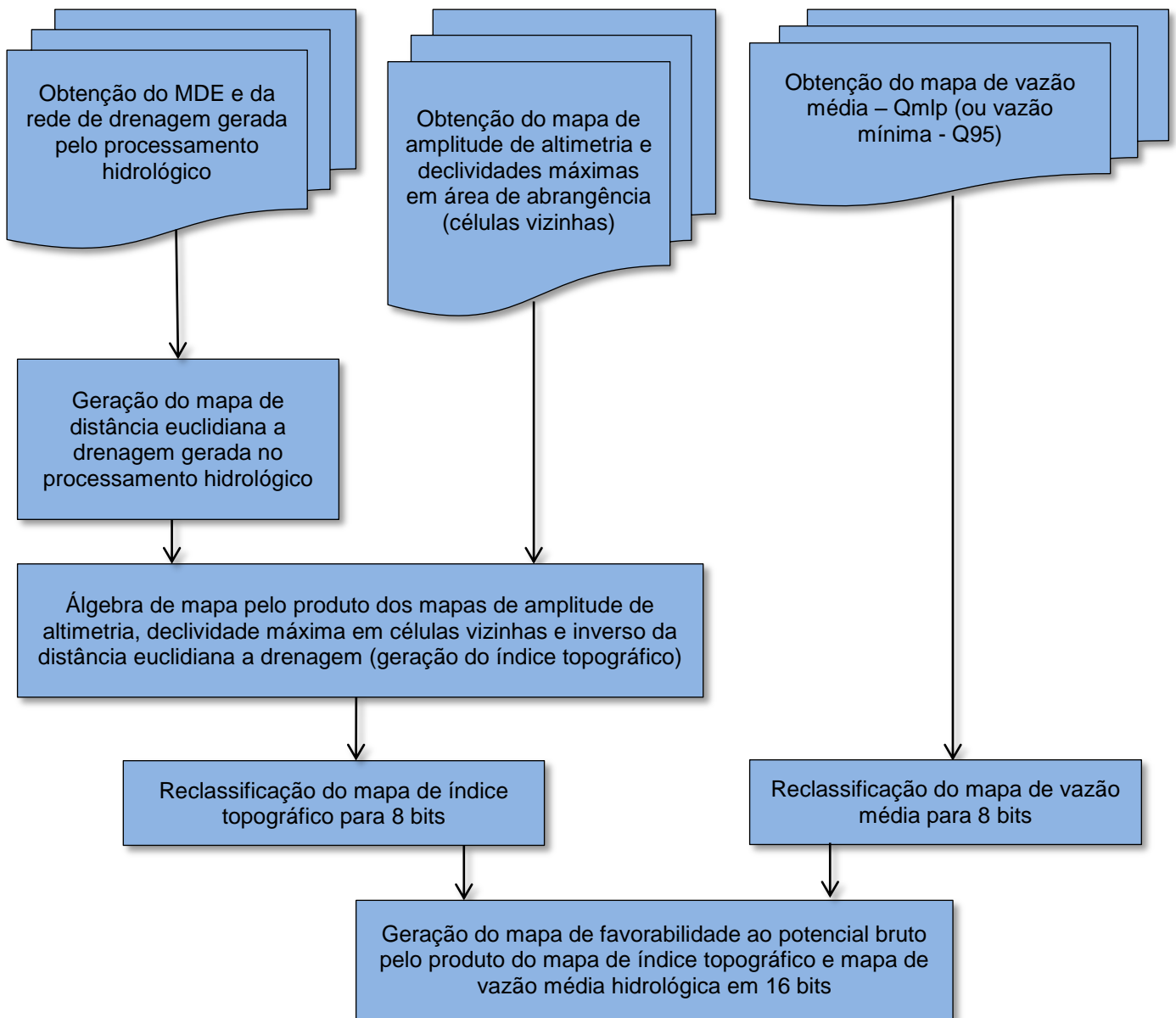


Figura 3.6. Fluxo metodológico dos processos aplicados para o mapa de favorabilidade ao potencial bruto hidroelétrico.

Fluxos da análise multicritério pelo processo AHP:

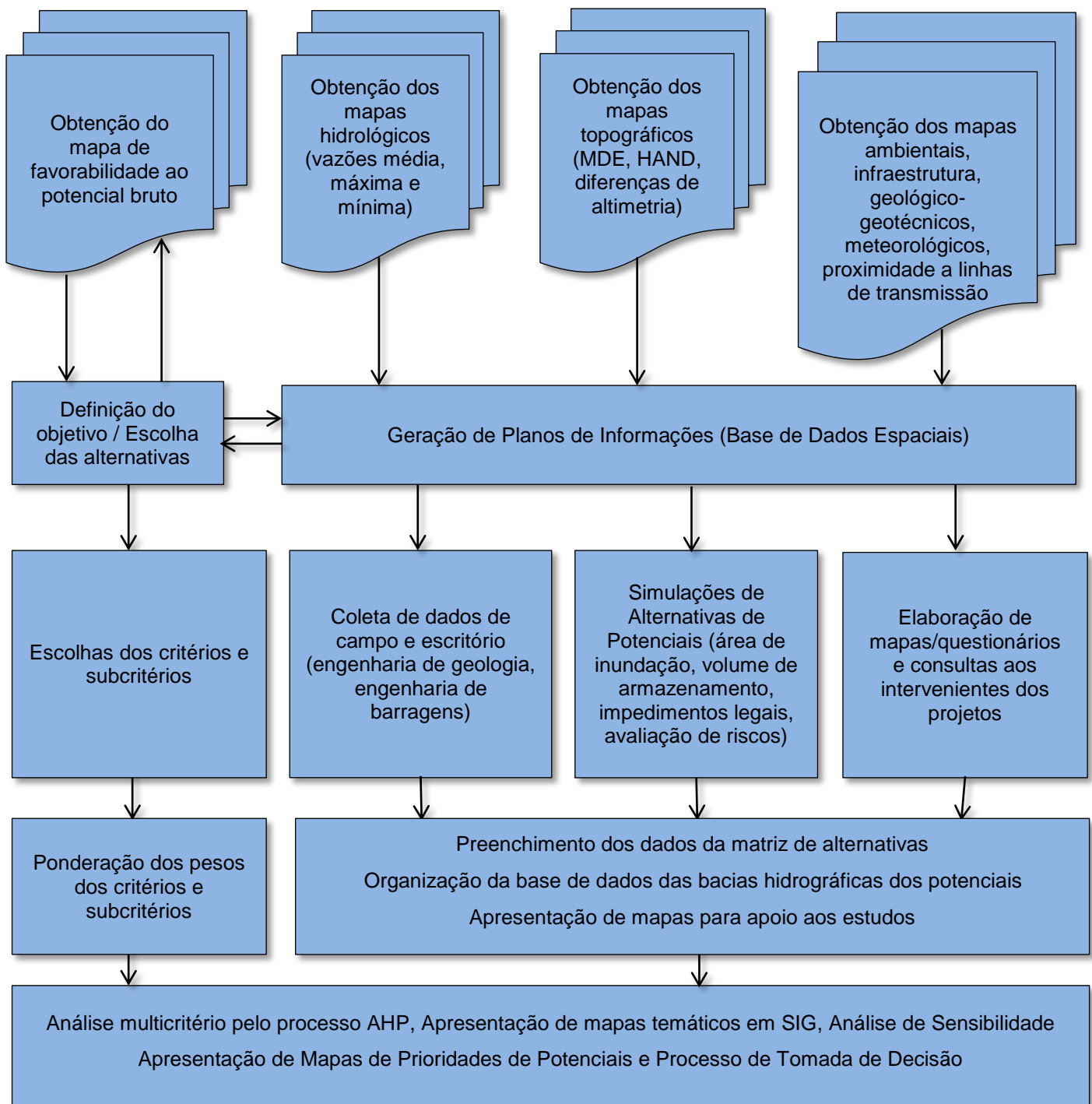


Figura 3.7. Fluxo metodológico dos processos aplicados para análise multicritério SIG e AHP.

3.3 MATERIAIS

Os requisitos básicos para a maioria dos experimentos de modelagem de distribuição de informações espaciais em SIG de potenciais hidroelétricos são: possuir um número mínimo de dados de fatores relacionados aos potenciais georreferenciados (ex. vazões, potência hidro energética), e dados ambientais que devem estar relacionados à ocorrência, numa escala apropriada para a análise.

As escolhas das variáveis, informações e dados utilizados obedeceram a critérios de disponibilidade e qualidade da informação. As escolhas das variáveis foram orientadas por pesquisas das melhores práticas mundiais em prospecção de potenciais hidroelétricos e dos métodos utilizados em países que reúnem aspectos sócio econômicos ou ambientais que se assemelham ao Brasil. Para escolha dos materiais também foram considerados os métodos relevantes à prospecção do potencial hidroelétrico aplicáveis ao território nacional.

As variáveis necessárias aos procedimentos de análises em ambiente SIG foram orientadas por estudos no Brasil em trabalhos de Ávila *et al.* (2003), Faria Filho (2007), Polizel (2007), Larentis (2009), Larentis *et al.* (2010), Faria (2011), Lima *et al.* (2012); no Canadá, Cyr *et al.* (2011); na Tailândia, Rojanamon *et al.* (2009); na Coreia do Sul, Yi *et al.* (2010); na Índia, Dudhani *et al.* (2006); na Bacia do rio Prata (Argentina, Paraguai, Uruguai e Brasil), Cuya *et al.* (2013) e em levantamentos de trabalhos mundiais a pesquisa realizada por Punys *et al.* (2011).

Também foram avaliados dados, informações e recomendações técnicas, propostos na etapa de *inventário preliminar de potenciais hidroelétricos remanescentes*, constantes nas diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2000).

3.3.1 Base de Dados e informações

As bases de dados obtidas para os estudos têm fontes nas instituições públicas que gerenciam informações de interesse do setor elétrico nas bacias do Estado de Minas Gerais: Eletrobrás, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE e do convênio Universidade Federal de Viçosa – UFV e da Fundação Rural Mineira- Ruralminas do Governo do Estado de Minas Gerais. As informações obtidas por meio da WEB possuem como condicionante o posicionamento espacial e a possibilidade de trabalhar com análises topológicas e atributos não espaciais (Tabela 3.2). Portanto, os dados utilizados na pesquisa têm fonte na administração pública e não foram realizados levantamentos em campo.

As bases distintas de dados da bacia do rio Doce foram compatibilizadas no ambiente de sistemas de informações geográficas do aplicativo ArcGIS da ESRI. Quando necessário essas bases foram reprojadas para DATUM WGS-84, UTM Zona 23. Informações em escala nacional e regional foram projetadas em coordenadas geográficas e DATUM WGS-84. Na Tabela 3.2 são apresentadas as fontes e os vários temas ou planos de informações para aplicações automatizadas ou semi-

automatizadas de ferramentas e técnicas conforme os objetivos das análises para quantificação dos critérios das alternativas de potencial hidroelétrico.

Tabela 3.2. Base de Informações para seleção das áreas de prospecção de hidroelétricas. Adaptado de Lima *et al.* 2012.

| ID | Plano de Informação (primária) | ID | Plano de Informação (derivada) |
|----|---|------|---|
| 1 | Unidades de conservação (Federal, Estadual e Municipal) | | |
| 2 | Terras Indígenas | | |
| 3 | Quilombos | | |
| 4 | Assentamentos INCRA | | |
| 5 | Área de influência das Usinas | | |
| 6 | Reservatório | | |
| 7 | Linhas de Transmissão | | |
| 8 | Litologia | | |
| 9 | Vias Rodoviárias | | |
| 10 | Vias Ferroviárias | | |
| 11 | Áreas Aeroportuárias | | |
| 12 | Uso do Solo | | |
| 13 | Mapa de altimetria | | |
| 14 | Mapa de precipitação média anual | | |
| 15 | Mapa de densidade de drenagem | | |
| 16 | Rede Hidrográfica | | |
| 17 | Mapa de Ottobacias nível 3 | | |
| 18 | MDE (SRTM) | 18.1 | Mapa de comprimento a montante |
| | | 18.2 | Mapa de acumulação de fluxo |
| | | 18.3 | Focal Range |
| | | 18.4 | HAND |
| | | 18.5 | Perfil Longitudinal dos rios* |
| 19 | Mapa de Vazões específicas | 19.1 | Mapa de Q _{mlp} por vazões específicas |
| 20 | Estações/Informações Hidrométricas | 20.1 | Mapa de Q _{mlp} por WGR |
| | | 20.2 | Mapa de vazões máximas Q ₅₀₀ |
| | | 20.3 | Mapa de vazões mínimas Q _{7,10} |
| | | 20.4 | Mapa de vazões mínimas Q ₉₅ |
| 21 | Usinas Hidroelétricas (PCH;UHE) | 21.1 | Mapa de Favorabilidade ao Potencial |

* Informações em formulação gráfica derivadas do plano de informação de altimetria do MDE.

| Cor | Instituição Pública (Fonte ou Publicação da Informação) |
|-----|---|
| | ANEEL/EPE |
| | CPRM |
| | IBGE |
| | DNIT / ANEEL |
| | ANAC / ANEEL |
| | INPE |
| | USGS |
| | ANA |
| | Universidade Federal de Viçosa |

3.3.2 Informações públicas do setor elétrico brasileiro

As instituições públicas determinam a organização e validam os dados disponibilizados à sociedade e ao setor de energia elétrica. As bases de dados utilizados no trabalho foram relacionadas por instituições a seguir:

3.3.2.1 Eletrobras

As bases de dados foram extraídas do Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT) desenvolvido pela Eletrobrás. As informações de “Potencial hidrelétrico brasileiro por sub-bacia hidrográfica” em estágios estimado, inventariado, em operação e a capacidade instalada foram implantadas no ArcGIS, compatibilizando os códigos das bacias da Eletrobrás/ANEEL com os códigos de Ottobacias nível 3 utilizados pela ANA/ANEEL.

3.3.2.2 ANEEL/EPE

Foram utilizadas informações do Banco de Informações de Geração – BIG e do Sistema de SIGEL. As informações do BIG obtidas por meio “on-line” estão agregadas e impossibilitam a implantação desagregada no SIG. As informações implantadas no SIG foram obtidas do Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico - SIGEL em formato “shapefile”. As classes dos atributos apresentados indicam somente as informações extraídas do banco de dados do SIGEL. Foram verificadas ausência de dados em classes de atributos. As informações do SIGEL são possíveis de serem exportadas “on-line” para análises e consultas em um SIG.

Tabela 3.3. Temas e classes dos atributos extraídos das bases de dados do SIGEL/Aneel.

| Planos de informação | Classes dos atributos utilizadas na pesquisa | Origem do dado |
|--|---|----------------|
| Unidades de conservação | Categoria | MMA |
| | Grupo | |
| | Esfera | |
| | Órgão Gestor | |
| Terras Indígenas | Grupo indígena | FUNAI |
| | Terra indígena | |
| | Situação registro | |
| Litologia/Hidrogeologia | Sigla | CPRM |
| | Hierarquia | |
| Área de influência das Usinas Hidroelétricas | Não existe polígono de delimitação de uso público | ANEEL |
| Reservatório | Volume máximo de operação | ANEEL |
| | Volume mínimo de operação | |
| | Volume útil | |
| | Nível máximo de operação | |
| | Nível mínimo de operação | |
| | Área de drenagem | |
| | Área de inundação | |
| Obs: Não existe polígono de áreas de inundação nem dos espelhos de água de todos reservatórios | | |

| | | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Linhas de Transmissão | Operador | ANEEL/ONS |
| | Tensão | |
| Vias Rodoviárias | Administração | DNIT/ORGÃOS ESTATUAIS |
| | Código | |
| | Tipo | |
| Vias Ferroviárias | Administração | DNIT |
| | Código | |
| | Tipo | |
| Áreas Aeroportuárias | Operador | ANAC |
| | Código | |
| | Área da zona de segurança | |
| Usinas Hidroelétricas (PCH;UHE) | Potência outorgada | ANEEL |
| | Área do reservatório | |
| | Área de drenagem | |
| | Nível de área a montante | |
| | Nível de área a jusante | |
| | Queda bruta | |

Conforme dados do SIGEL, os polígonos georreferenciados dos reservatórios somente contemplam um universo de 169 aproveitamentos hidroelétricos em todo o território nacional e são exclusivamente de UHE. Faltam metadados. Não são apresentados limites das áreas de cheias máximas nem os limites espaciais georreferenciados das áreas geográficas para uso do bem público outorgado.

3.3.2.3 IBGE

Os mapas de uso e ocupação do solo extraídos do IBGE para implantação da base de dados espaciais são os de agricultura, mapas de solo e vegetação. Há ausência de informações para algumas regiões.

3.3.2.4 ANA

As informações de hidrologia podem ser obtidas pelo Sistema de Informações Hidrológicas – HidroWEB da ANA. Porém, não é possível nesse sistema a importação “on-line” de arquivos de dados em formato espacial para análises em sistemas SIG. As informações hidrológicas foram utilizadas para fins de consultas individualizadas.

A ANA adotou a representação espacial de sub-bacias pelo método Otto Pfastetter (VERDIN E VERDIN, 1999). Esse método permite uma lógica hierárquica de codificação de canais de rios. Foram utilizadas as informações de posicionamento das Estações Fluviométricas, Hidrografia em Sub-bacias nível 3 para delimitação dos polígonos. A hidrografia integrada da ANA tem escala 1: 250.000 e não é compatível (casa, ou “match”) com a hidrografia gerada pelos métodos aplicados no ArcHydro (MAIDMENT, 2002) na versão ArcGIS 10. Em acordo com a UNB, a ANA cedeu informações sobre a rede hidrográfica com informações de vazão média de longo período por trecho de rios. Esses dados possibilitaram a geração de informações de vazões médias para o Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto Hidroelétrico do Brasil.

Tabela 3.4. Temas, classes do atributo e nomenclatura da informação hidrográfica da ANA.

| Plano de informação | Classe do atributo | Nomenclatura |
|-----------------------|--------------------|--|
| Hidrografia Integrada | NUCOMPTREC | Comprimento do trecho de drenagem |
| | NUAREACONT | Área de contribuição direta da ottobacia |
| | NUAREAMONT | Área a montante a partir do trecho de drenagem |
| | NORIOCOMP | Nome completo do rio |
| | NUCOMPRIO | Comprimento do rio |
| Sub-bacia | Shape | Polígono representativo da sub-bacia nível 3 |
| Est_Pluviometrica | Shape | Ponto representativo da localização da estação pluviométrica gerenciado pela ANA |

3.3.2.5 Universidade Federal de Viçosa e RURALMINAS

O “Atlas Digital das Águas de Minas” é o principal produto desenvolvido no âmbito do programa de pesquisa e desenvolvimento denominado HIDROTEC, fruto da parceria institucional entre duas secretarias de Estado e órgãos vinculados: Secretaria de Estado da Agricultura Pecuária e Abastecimento (SEAPA) e a Fundação Rural Mineira (RURALMINAS), a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Os dados do programa HIDROTEC destinam-se, entre outras aplicações, à quantificação da disponibilidade hídrica para projetos de agricultura ou projetos para construção de reservatórios. Conforme os autores, as informações geradas são importantes para o diagnóstico e planejamento de projetos de pequeno e médio porte, na área de recursos hídricos, tais como: vertedores de barragens, canais, obras de proteção contra inundações, bueiros, galerias pluviais, pontes, projetos de abastecimento de água e irrigação, sistemas de drenagem, volume de regularização, projetos de pequenas centrais hidrelétricas, outorga de uso de água superficial, navegação, estudos sobre a qualidade de água, dentre outros, além daqueles relativos aos projetos hidroagrícolas.

Na bacia do rio Doce as informações contidas nas 6 (seis) divisões das sub-bacias do Hidrotec devem ser compatibilizadas com as 9 (nove) sub-bacias utilizadas pela ANA no formato Ottobacias nível 3 (Figura 3.1).

No mapa da Figura 3.8 os pontos vermelhos representam as cidades, os triângulos amarelos representam as usinas hidroelétricas com atributos de potência, volume de reservatórios e áreas de reservatórios que podem ser confrontados com as informações do SIGEL.

Ao longo dos canais de drenagem existem informações que podem ser consultadas “on-line” ao clicar em cima da entidade gráfica. Cada informação pode ser extraída para formar uma tabela de pontos com informações hidrológicas do programa Hidrotec.

Foram extraídas informações hidrológicas sobre os rios da bacia do rio Doce (Figura 3.8).

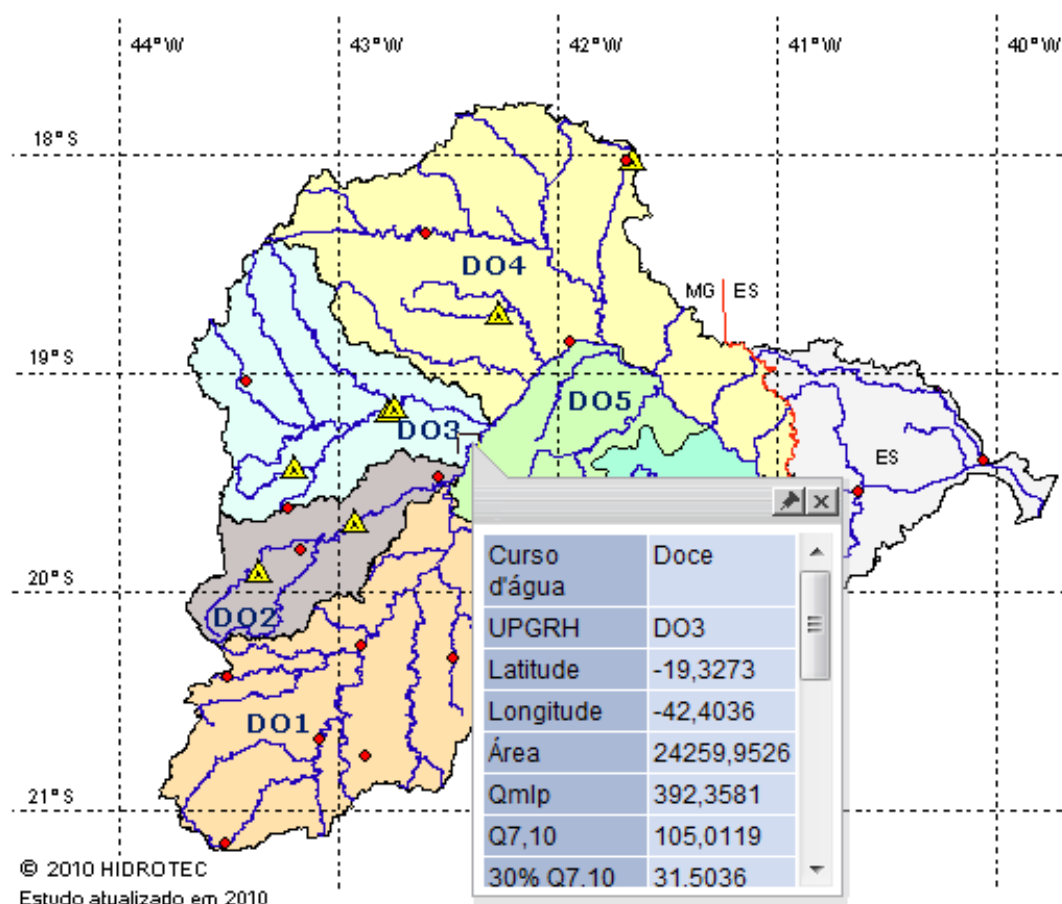


Figura 3.8. Informações hidrológicas disponibilizadas na rede hidrográfica da bacia do rio Doce/MG do Atlas Digital das águas de Minas Gerais. Programa Hidrotec, 2010.

Nos trechos dos rios, para cada local (ponto) podem ser extraídas as seguintes informações hidrológicas (Tabela 3.5):

Tabela 3.5. Classes e nomenclatura da informação hidrológica do Hidrotec em locais do rio.

| Classe do atributo | Exemplo da informação | Nomenclatura |
|--------------------|-----------------------|--|
| Curso d'água | Itambacuri | Nome do curso d'água |
| UPGRH | DO4 | Código da sub-bacia hidrográfica conforme Hidrotec |
| Latitude | -18,4235 | Coordenada de latitude (graus decimais) |
| Longitude | -41,8147 | Coordenada de longitude (graus decimais) |
| Área | 1248,3230 | Área de contribuição no ponto (quilômetros quadrados - km ²) |
| Qmlp | 15,6586 | Vazão média de longo período (litros por segundo – l/s) |
| Q7,10 | 2,4342 | Vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos (l/s) |
| 30% Q7,10 | 0,7303 | Limite máximo proposto ⁴⁵ de 30% de derivação para uso consuntivo (l/s) |

⁴⁵ Em Minas Gerais, de acordo com a Portaria 010/98 do Instituto Mineiro de Gestão da Água-IGAM é fixado o percentual de 30% da Q7,10 como limite máximo de derivações consuntivas a serem outorgadas, em cada seção da bacia hidrográfica considerada, garantindo, assim, vazões residuais mínimas, a jusante, equivalentes a 70% da Q7,10.

| | | |
|--------------|----------|--|
| 70% Q7,10 | 1,7039 | Limite proposto de vazões residuais mínimas a jusante (l/s) |
| Qreg max | 10,9610 | Vazão máxima possível de ser regularizada (l/s) |
| Qreg max/out | 9,2571 | Vazão máxima possível de ser regularizada e disponibilizada para outorga (l/s) |
| Vreg max | 512,8244 | Volume máximo possível de ser regularizado (litros - l) |
| Vreg min | 0,0814 | Volume mínimo possível de ser regularizado (l/s) |
| Q90 | 4,4916 | Curva de permanência para 90% de probabilidade (l/s) |
| Q95 | 3,3605 | Curva de permanência para 95% de probabilidade (l/s) |
| Qmax 10 | 230,0074 | Vazão máxima diária anual para período de retorno de 10 anos (l/s) |
| Qmax 20 | 268,1033 | Vazão máxima diária anual para período de retorno de 20 anos (l/s) |
| Qmax 50 | 316,1289 | Vazão máxima diária anual para período de retorno de 50 anos (l/s) |
| Qmax 100 | 352,7926 | Vazão máxima diária anual para período de retorno de 100 anos (l/s) |
| Qmax 500 | 437,4820 | Vazão máxima diária anual para período de retorno de 500 anos (l/s) |

Por meio das coordenadas geográficas (latitude; longitude) os pontos do Hidrotec com informações hidrológicas foram georreferenciados no SIG para gerar uma base de referências hidrológicas. Essas informações serão utilizadas na regionalização e validação de vazões médias, máximas e mínimas em todas as sub-bacias da bacia do rio Doce.

3.3.2.6 INPE

A Divisão de Processamento de Imagens do INPE - DPI/INPE disponibiliza o produto AMBData, uma base de dados de variáveis ambientais para modelagem de distribuição de espécies. Segundo o DPI/INPE⁴⁶ a obtenção destes dados é feita pelas instituições competentes, através de cartografia, imagens de satélite, fotos aéreas ou das leituras de estações de coleta de dados. Os dados brutos são refinados através de técnicas de classificação/agrupamento, no caso de imagens, e de interpolação no caso de dados das estações meteorológicas. Os mapas ambientais obtidos do AMBData foram incluídos na base de dados da pesquisa em forma de grade (grid, imagem matricial ou raster).

As informações climáticas foram Precipitação Anual, Sazonalidade da Precipitação (obtida pelo coeficiente de variação das precipitações). As variáveis do meio ambiente foram Densidade de Drenagem e Distância Vertical à Drenagem mais Próxima – HAND (Amaral *et al.*, 2007). Outras variáveis foram utilizadas para avaliação estatística.

Os dados climáticos fornecidos na base do AMBData são obtidos do WorldClim - Global Climate Data. O Worldclim⁴⁷ é uma base de dados climáticos globais que fornece layers em diferentes resoluções referentes ao clima atual, e também para cenários climáticos passados e futuro.

Conforme Ximenes (2008) a grade de densidade de drenagem apresentada no AMBData foi gerada a partir da aplicação de um algoritmo de interpolação espacial (Kernel) sobre os dados de rede de drenagem fornecida pelo projeto HydroSHEDS (LEHNER *et al.* 2006), derivada das imagens SRTM (Shuttle Radar Topographic

⁴⁶ AMBData, disponível em http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/descricao_dados.php. Acesso em 27/8/2013.

⁴⁷ Word Clim, disponível em <http://www.worldclim.org/>. Acesso em 27/8/2013.

Mission), de resolução espacial original de 15 arc-segundos, ou aproximadamente 500 metros. Há uma distinção na hidrologia entre densidade do curso d'água e densidade de drenagem. A densidade do curso d'água de uma bacia de drenagem é representada como o número de cursos d'água por quilômetro quadrado, enquanto a densidade de drenagem é representada como o comprimento total de todos os canais fluviais (perenes e intermitentes) por unidade de área da bacia e serve como um índice de desenvolvimento do canal em uma área específica (SOLIMAN, 2010). Nesse estudo, o termo de “densidade de drenagem” foi utilizado conforme Ximenes (2008) e as informações extraídas do AMBData.

3.3.2.7 USGS

A Modelo Digital de Elevação foi obtido do MDE SRTM-4 (USGS, 2010) em formato GEOTIFF (16 bits) com resolução espacial de 90 metros, unidade de altitude em metros, sistema de coordenadas geográficas WGS 1984. Foi gerado pelo United States Geological Service – USGS considerada a versão final (“Finished SRTM Data⁴⁸”).

3.3.3 Compatibilização das informações espaciais

A integração das informações originadas de fontes distintas é etapa necessária para as análises. Entre as principais características dos SIG estão a integração de informações espaciais e oferecimento de mecanismos de análise geográfica (Câmara e Freitas, 1997). Os principais fatores na estimativa de potencial bruto hidroelétrico, queda e vazão, factíveis de aplicações em SIG, não são suficientes para estudos de prospecção de potencial hidroelétrico. A etapa de compatibilização visa propor uma base integrada de dados espaciais necessárias ao fornecimento de informações ao processo de tomada de decisões por métodos multicritérios.

As compatibilizações embasam-se nos seguintes critérios adotados:

- *Projeção geográfica para pequenas escalas (escalas regionais e nacionais) e projeção UTM para escalas de bacias hidrográficas (em ottobacias nível 3);*

Informações nacionais do MDE SRTM estão em projeção geográfica assim como todas as informações espaciais das instituições que possuam abrangência nacional (ex. AMBDATA do DPI/INPE; IBGE; bacias hidrográficas disponibilizadas pela ANA).

A informação espacial em escala de sub-bacia hidrográfica (ex. a bacia do rio Doce delimitada em ottobacia nível 3) foi projetada em UTM no elipsoide WGS 84. Quanto ao fuso adotou-se a Zona UTM 23 em toda a sub-bacia hidrográfica.

- *Utilização de ottobacias (VERDIN e VERDIN, 1999; VERDIN, 1997) conforme topologia adotada pela ANA;*

⁴⁸ Disponível do USGS <http://srtm.usgs.gov/>. Acesso em 12/8/2013.

A divisão por sub-bacias hidrográficas proposta pelo DNAEE, utilizada pela ANA na operação da rede hidrométrica nacional⁴⁹ é ainda citada nas atuais publicações técnicas do setor elétrico. Essa divisão de sub-bacias do DNAEE será adotada somente quando não houver necessidade da padronização com as otobacias propostas por Pfafstetter (1989).

A biblioteca virtual no site da ANA (Agência Nacional de Águas), no portal HidroWEB⁵⁰ disponibiliza em formato “*shapefile*” as delimitações das bacias hidrográficas segundo os seis níveis de classificação de Otto Pfafstetter (1989) e trechos de otobacias.

- Adoção de planos de informações de mesma natureza quando não for possível a utilização de um único plano de informação;

A rede hidrográfica da ANA não se superpõe aos canais de drenagem gerados pelo aplicativo ArcHydro do ArcGIS/ESRI (preenchimento de sumidouros e método D8). Os mapas de acumulação de fluxo em arquivos matriciais, sem um processo de automatização e compatibilização de dados, não possibilitam transferir diretamente a informação de área de acumulação de fluxo à montante (de um arquivo raster) para a rede de drenagem (arquivos de vetores - linhas) ou para as estações hidrométricas (arquivos de vetores – pontos).

Também, os dados hidrológicos de estações fluviométricas da ANA não coincidem espacialmente com o posicionamento dos dados do Hidrotec devido a acurácia do dado cadastrado. Além disso, não existe intersecção entre esses dados e a rede hidrográfica apresentada pela ANA. Os posicionamentos das informações hidrológicas do Hidrotec foram deslocados para se conectarem aos canais de drenagem gerados pelo ArcHydro (MAIDMENT, 2002). O posicionamento das informações hidrológicas sobre a hidrografia gerada do MDE SRTM possibilita a extração exata das informações distribuídas dos modelos matriciais.

Para solucionar essas incompatibilidades de posicionamento das informações e acurácias diferentes, originadas nos processos metodológicos, são realizadas análises topológicas e aplicados métodos para geração de dados secundários (ex. interpolações, regionalização de vazões e geração intermediária de mapas temáticos).

3.3.4 Geração da base de dados e metadados

A base de dados das informações espaciais foi organizada em uma base única, originada de fontes distintas no ambiente ArcGIS em formato “*shapefile*” para as variáveis dependentes (vazões) e matriciais para as variáveis independentes.

⁴⁹ A Agência Nacional de Águas – ANA, criada em 17 de julho de 2000, recebeu dentre outras atribuições, a de promover a coordenação das atividades desenvolvidas no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional, em articulação com os órgãos e entidades públicas e privadas que a integram, ou que dela sejam usuárias, cabendo então, à ANA, manter e disponibilizar o cadastro atualizado das estações hidrometeorológicas do País. Disponível em <http://arquivos.ana.gov.br/infhidrológicas/InventariodasEstacoesFluviometricas.pdf>. Acesso em 28/8/2013.

⁵⁰ Portal HIDROWEB, <http://hidroweb.ana.gov.br/>

Todos os planos de informações deveriam possuir os metadados⁵¹ associados. Porém, apesar dos esforços públicos do INDE⁵² no sentido de padronização e descrição, os dados e atributos desse trabalho não possuíam informações explícitas de metadados.

Não foram despendidos esforços para obtenção individualmente dos metadados sobre origem, datas, metodologia da geração, precisão e exatidão, erros sistemáticos, frequência da atualização, séries históricas, instituição gerenciadora e mantenedora do dado ou informação.

3.4 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

3.4.1 Introdução

Nos estudos topográficos foram elaborados, como produtos finais, dois mapas de relevância a prospecção de potenciais hidroelétricos: o mapa de identificação de “gargantas de rios” e o mapa do índice topográfico da favorabilidade a potenciais hidroelétricos. Também foi elaborado o mapa de declividade derivado da altimetria do MDE/SRTM.

Por meios de estatística zonal (TOMLIN, 1990), os mapas de altimetria e declividade (BURROUGH, 1998) foram derivados para geração dos mapas de altimetria por trecho de canal e mapa de declividade por trecho de canal, considerando as otobacias (PFAFSTETTER, 1989). Esses mapas serão utilizados para geração da declividade média por trecho de rio, aplicados nos estudos dos modelos hidrológicos.

3.4.2 Modelo Digital de Elevação do SRTM

O MDE utilizado foi o SRTM do USGS⁵³ com resolução de três arco-segundo de grau 3” (aproximadamente 90 x 90 metros), adquirida em janeiro de 2000. As informações topográficas em forma de matriz contínua sobre as áreas de estudo são a base de dados necessária à geração de informações da fisiografia da bacia hidrográfica e de alguns dados hidrológicos (ex. declividade em trechos de rios, mapa de acumulação de fluxo, comprimento à montante do canal de drenagem). O mapa de altimetria e a

⁵¹ Os metadados geoespaciais tem como objetivo descrever as características, possibilidades e limitações dos dados geoespaciais através de informação estruturada e documentada, possibilitando a criação de repositórios de dados dessa natureza, os quais podem ser encontrados pelos usuários através de um buscador geográfico ligado a diversos serviços, páginas e portais especificamente direcionados a este fim. Disponível em <http://www.metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/br/main.home>, acessado em 6/9/2013.

⁵² A **Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE** foi instituída pelo Decreto Nº 6.666 de 27/11/2008. A INDE nasce com o propósito de catalogar, integrar e harmonizar dados geoespaciais existentes nas instituições do governo brasileiro, produtoras e mantenedoras desse tipo de dado, de maneira que possam ser facilmente localizados, explorados e acessados para os mais diversos usos, por qualquer cliente que tenha acesso à Internet. Os dados geoespaciais serão catalogados através dos seus respectivos metadados, publicados pelos produtores/mantenedores desses dados. Disponível em http://www.inde.gov.br/?page_id=40. Acesso em 6/9/2013.

⁵³ Sítio da USGS para SRTM disponível em <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM2>, acessado em 3/9/2013.

representação unifilar dos rios estão apresentados na Figura 3.9, indicando a forte relação da geomorfologia com a rede hidrográfica superficial na bacia do rio Doce.

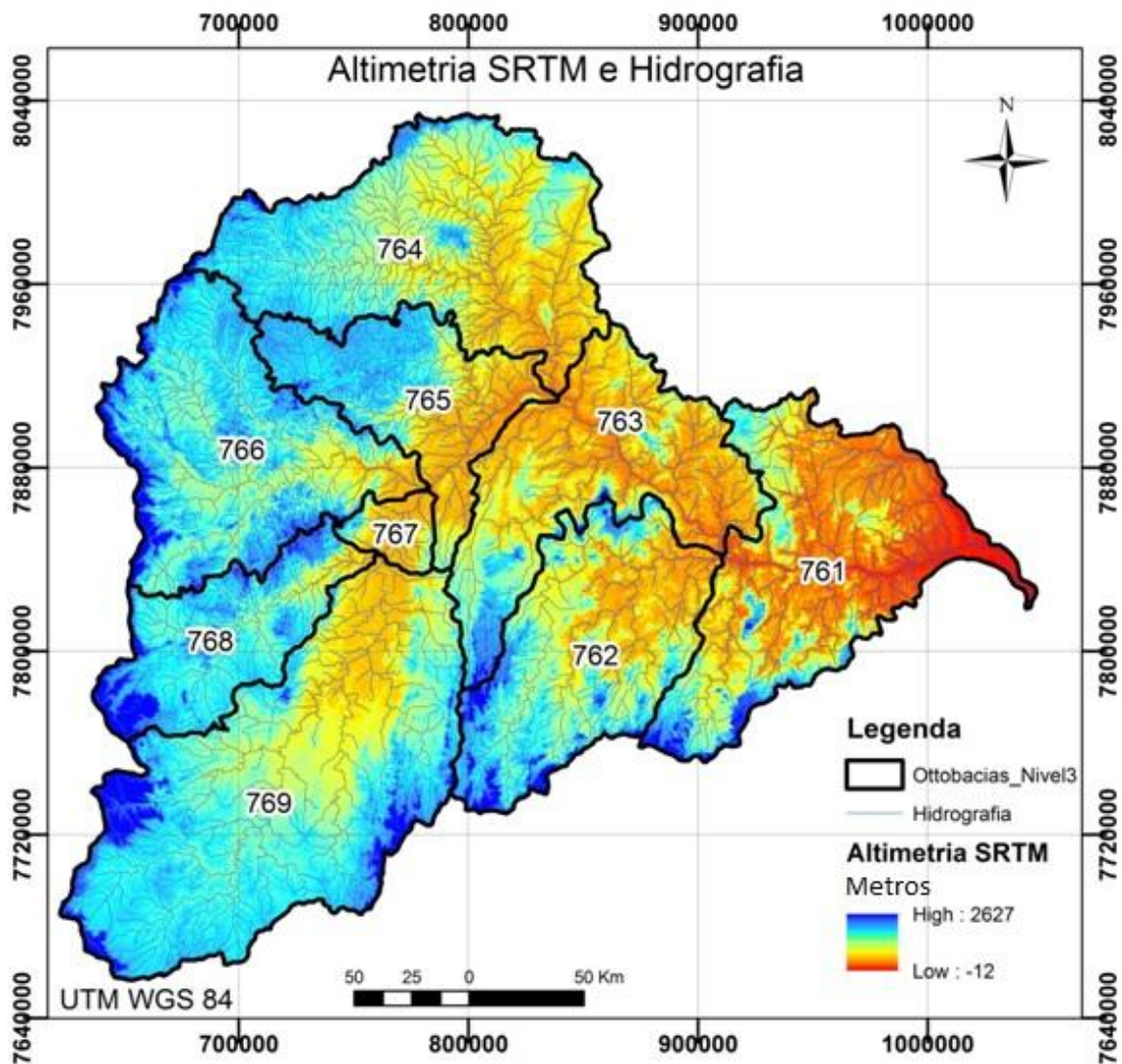


Figura 3.9. Informações distribuídas de altimetria, canais de drenagem e sub-bacias hidrográficas da bacia do rio Doce. Fonte SRTM do USGS (2010).

3.4.3 Modelo de declividade

O mapa de declividade (BURROUGH, 1998) foi gerado a partir do mapa de altimetria do SRTM, considerando a projeção plana UTM e a inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (diferença de altura de células vizinhas em relação à distância dos centros dessas de células), McCoy (2001). As informações de declividade da Figura 3.10 estão apresentadas em graus.

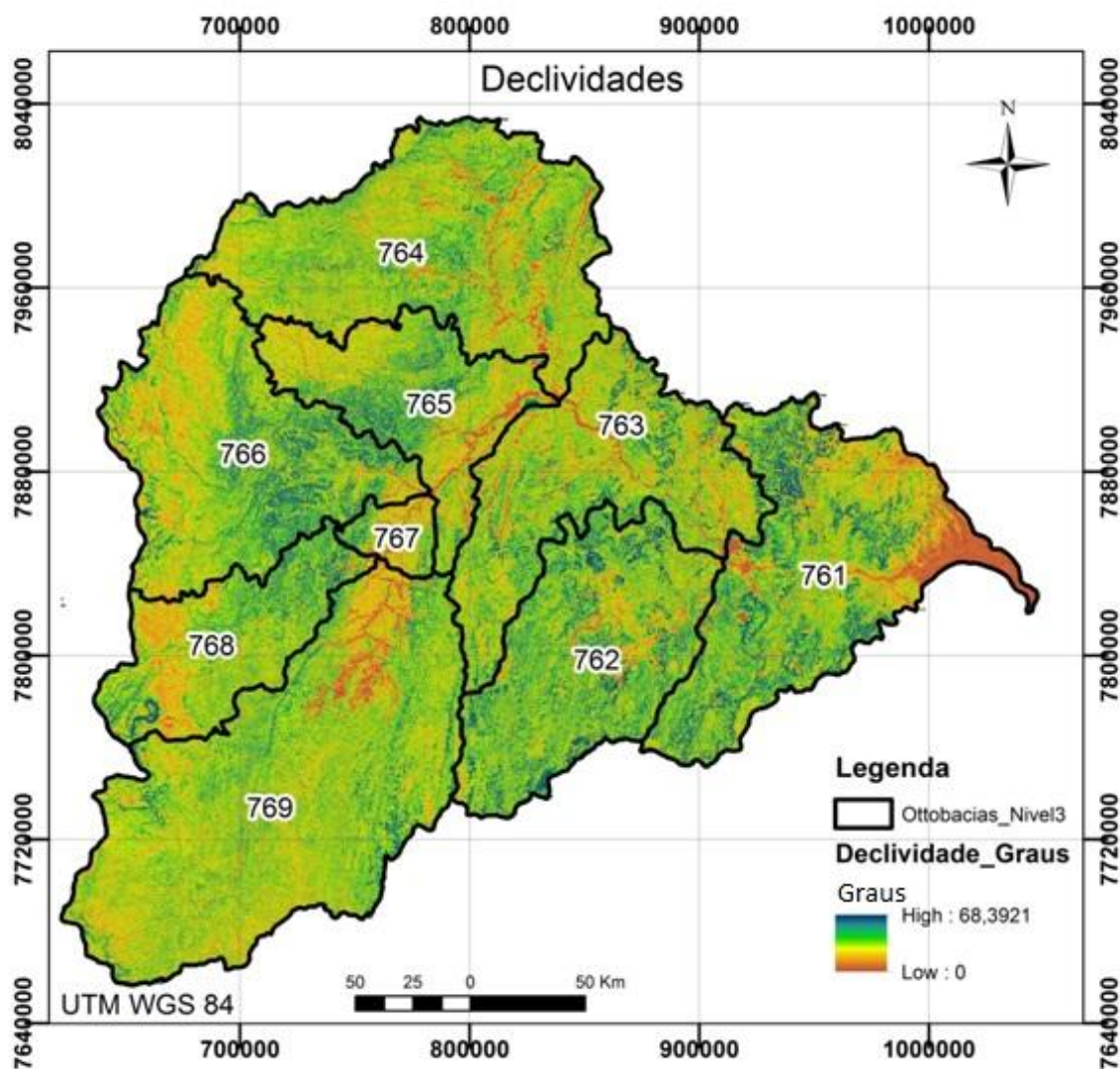


Figura 3.10. Informações distribuídas de declividade.

3.4.4 – Altura Acima da Drenagem Mais Próxima (HAND)

Outro modelo digital derivado das informações do SRTM foi o mapa da altura à drenagem mais próxima (HAND). A distância vertical à drenagem mais próxima proposta por Rennó *et al.* (2008) considera o fluxo unidirecional para determinar o caminho preferencial da água no terreno até a drenagem mais próxima. Essa variável geomorfológica foi utilizada para indicar a presença de locais favoráveis a construção de barramentos em canais de drenagem. O HAND da Figura 3.11, obtido do AMBData, foi computado⁵⁴ a partir da topografia proveniente do Modelo Digital de Elevação (MDE) do programa SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) conforme descrito em Rennó *et al.* (2008).

54 O algoritmo HAND para o cálculo da distância vertical à drenagem mais próxima foi implementado na linguagem IDL e utiliza funções do software ENVI 4.7. Esta implementação encontra-se disponível em <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/hand>.

Foi analisado o HAND com limiar de 50 (RENNÓ *et al.*, 2008), referente à área de contribuição mínima a partir do qual se inicia a drenagem (nascentes) com grade de aproximadamente 1 quilômetro. Conforme Rennó *et al.* (2008) quanto maior o limiar, menor a densidade de drenagem, ou seja, considera-se, neste caso, apenas os cursos d'água principais (maior ordem). Limiares menores incluirão as drenagens menores, aumentando o detalhamento da rede de drenagem considerada. Posteriormente foi aplicado o modelo HAND ao MDE/SRTM com resolução de 90 metros.

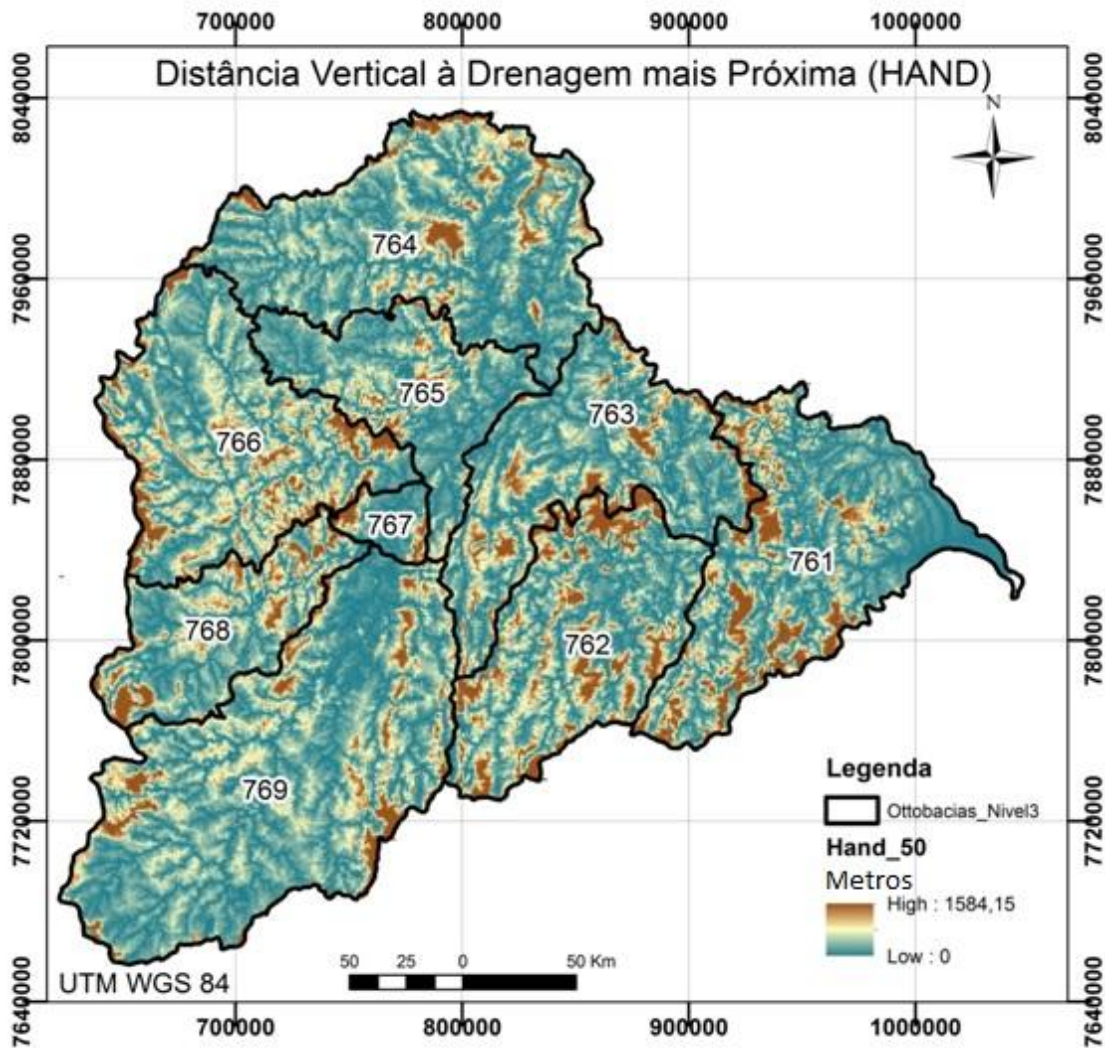


Figura 3.11. Informações distribuídas de HAND_50. Fonte: AMBData/INPE.

As funcionalidades do modelo gerado pelo método da distância vertical à drenagem mais próxima, (HAND) proposto por Rennó *et al.* (2008) e processado em resolução de 90 metros, foram comparadas ao HAND50 com resolução de 500 metros apresentado no AMBData.

O modelo HAND de maior resolução foi então verificado para aplicabilidade à identificação de áreas favoráveis à localização de “cânions” ou desfiladeiros com a presença de rios. Em geomorfologia, quando existem rios nessas formações, pode ser atribuído o termo “garganta de rio” (em inglês “water gap”).

A localização de gargantas de rio é útil na fase de investigação geológico-geotécnica em barragens. Nessa etapa de viabilidade, existe a necessidade da “localização do eixo barrável, o melhor tipo de barragem e, principalmente, a viabilidade técnica e econômica do empreendimento” (COSTA, 2012). A aplicabilidade do HAND para identificação de gargantas de rios foi verificada por meio de técnicas estatísticas e avaliação geomorfológica de aproveitamentos hidroelétricos existentes.

3.4.5 Estatística zonal

Foi utilizado o método de análises zonais (TOMLIN, 1990), “zonal statistics” do aplicativo ArcGIS, para elaboração dos mapas de diferença de altimetria e mapa de diferença de declividade no trecho do canal do rio, por limites de trechos de ottobacias (PFAFSTETTER, 1989). O método calcula a amplitude ou “range” dos números digitais (amplitude de altimetria) e a média dos números digitais (declividade média) das células das matrizes na área definida por um polígono fechado (ottobacia do trecho do canal do rio). Para os trechos de ottobacias, em cada canal de rio, foi determinada a amplitude de altimetria (Figura 3.12) em metros e a declividade média (Figura 3.13) em graus.

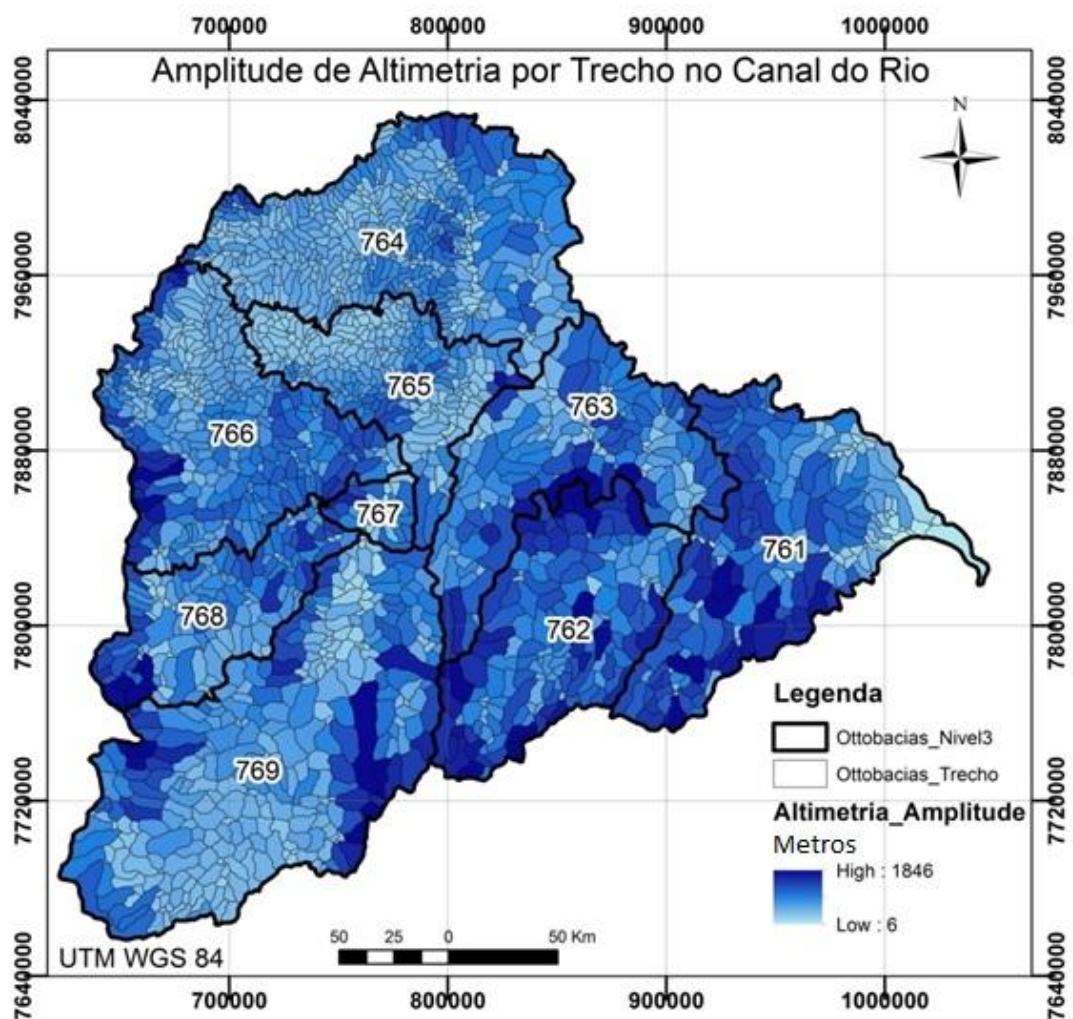


Figura 3.12. Amplitude de Altimetria por trecho do canal de rio.

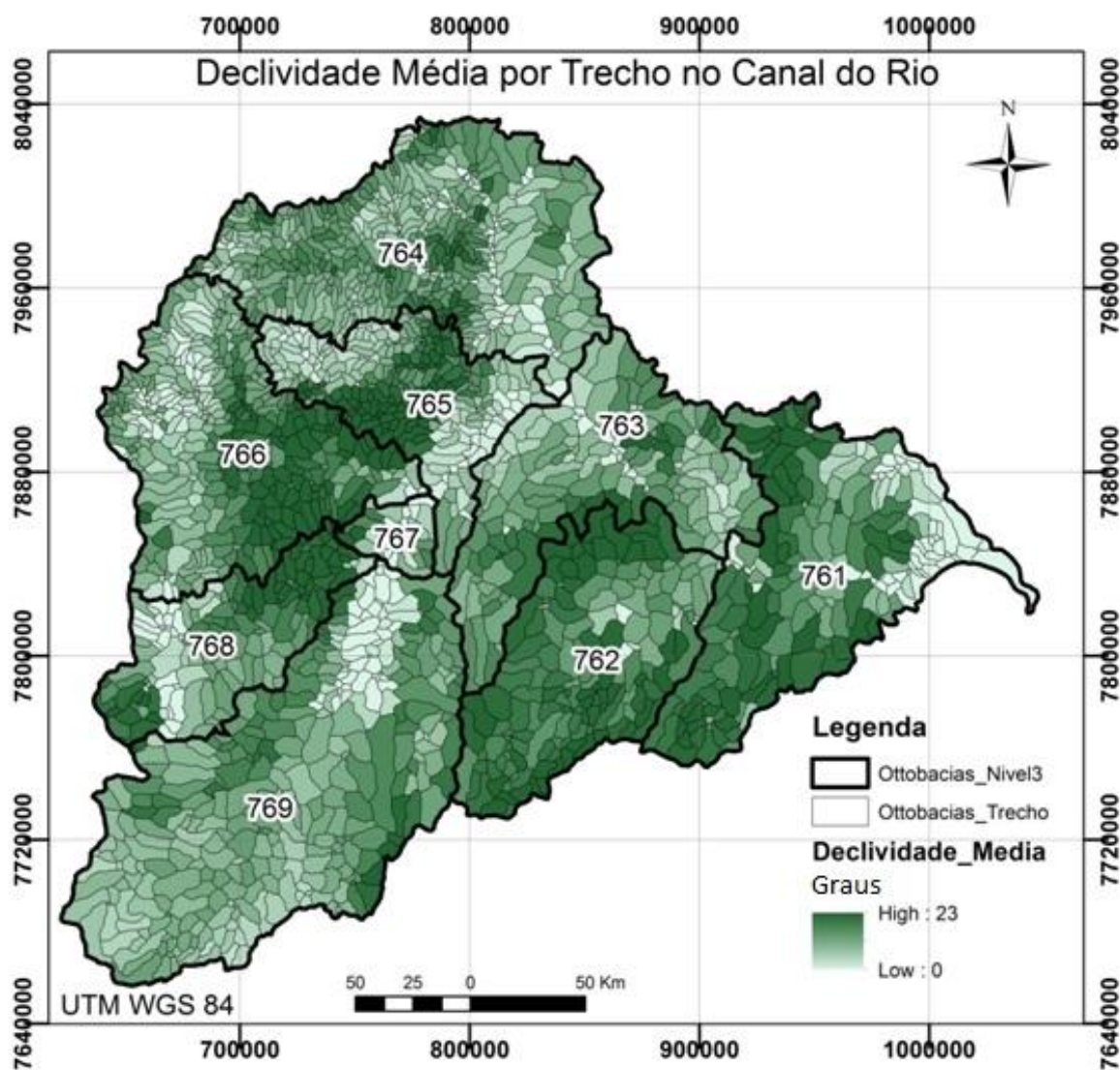


Figura 3.13. Declividade Média por trecho do canal de rio.

3.4.6 Estudo de Caso para identificação preliminar de diferença de níveis em potenciais hidroelétricos

A aplicação das ferramentas de “focal statistics” (TOMLIN, 1990) foi utilizada para identificação pontual de diferenças de nível em cursos d’água. Foi escolhida uma área geográfica com aproveitamento hidroelétrico conforme Figura 3.14 e Figura 3.15. As imagens visualizadas no Google Earth⁵⁵ possuem exagero vertical 3. O ponto em vermelho (Figura 3.15) representa a localização da casa de força da UHE Salto Grande, conforme dados apresentados no banco de dados do SIGEL/ANEEL.

⁵⁵ Aplicativo da Google® para visualização de imagens de satélites e mapas, que permite exagero de visualização vertical para destacar declividades a partir de um MDE.



Figura 3.14. Localização da Usina Salto Grande, extraído de imagens de 6/21/2013 do Google Earth. Fonte: Google Earth, acessado em 18/9/2013.

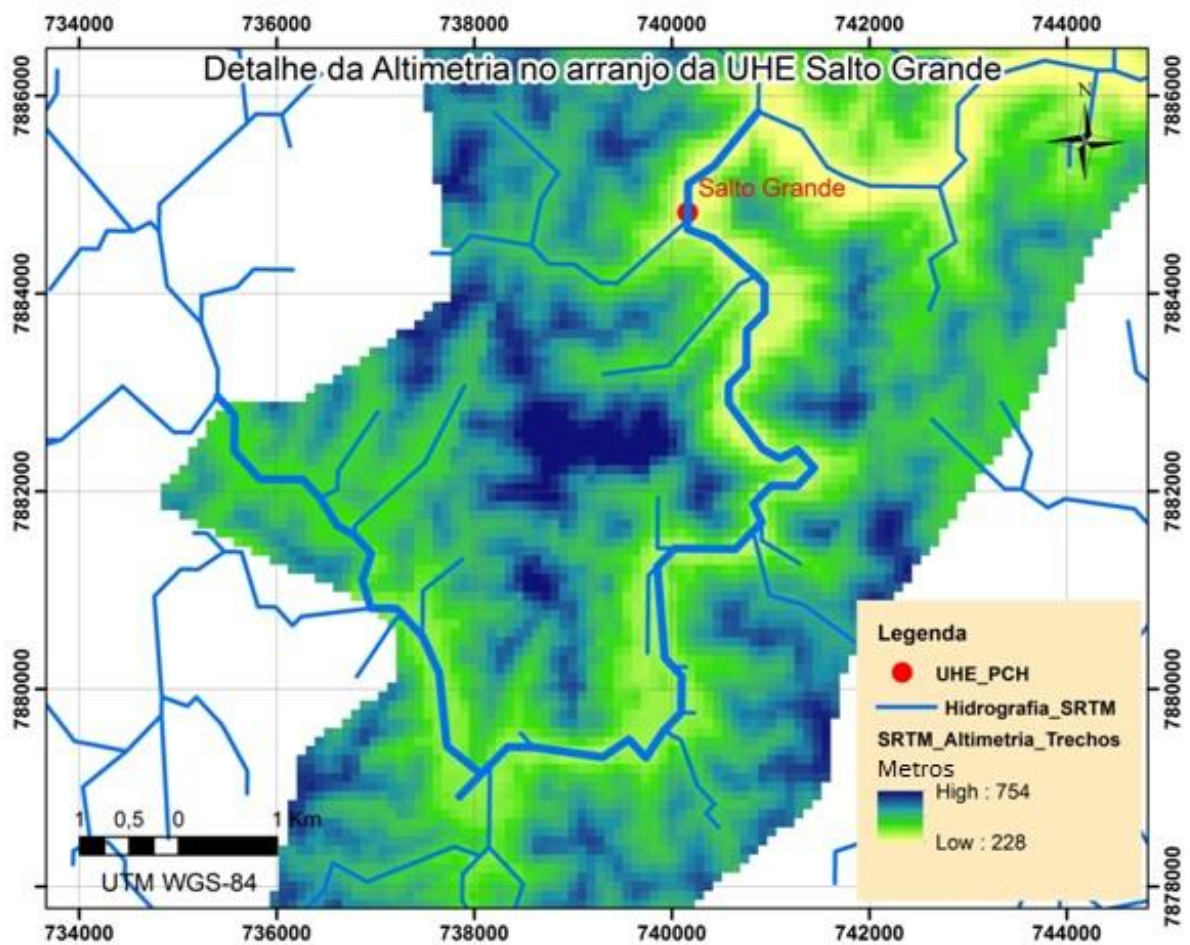


Figura 3.15. Localização da Usina Salto Grande, da altimetria do MDE/SRTM e da hidrografia extraída do MDE/SRTM.

3.4.6.1 Caracterização do aproveitamento hidroelétrico

A UHE Salto Grande possui barragem localizada no rio Guanhães e casa de força a mais de 4 km à jusante localizada no rio Santo Antônio. Trata-se de um tipo de derivação para alcançar maior energia potencial do reservatório por meio do aumento da diferença de níveis à montante na barragem e à jusante na casa de força onde se localiza o sistema turbina/gerador. A diferença de nível de água máximo à montante e à jusante é de 88,34 metros, conforme informações no sítio do Ministério dos Transportes, na Figura 3.16.

As localizações da barragem e da casa de força estão apresentadas na Figura 3.17, e os detalhes da barragem na Figura 3.19 e da casa de força na Figura 3.18. As cotas altimétricas apresentadas na Figura 3.17 são extraídas do Google Earth®.


| Ministério dos Transportes | |
|---|---|
| Resumo Informativo da Barragem da UHE Salto Grande - MG | |
|  | |
| Atualizado em | 07.10.03 |
| Localização | Rio Guanhães , Bacia Doce , Município Braúnas (MG) |
| Finalidade | Geração de Energia Elétrica |
| Volume | Concreto: - |
| Barragem Principal | Tipo : Concreto Gravidade Comprimento : 248,8 |
| Casa de Força | Tipo Estrutural : Abridada , Potência Unitária : , Número de Unidades : 4 |
| Vertedoura | Tipo : - , Comporta : Setor , Capacidade : 1500 m ³ /s |
| Níveis de Operação | NA Máx Normal Montante : 318 m NA Máx Normal Jusante : 229,66 m |
| Reservatório (N.A. Máx Normal) | Área : 5,8 km ² Volume : 58 km ³ |

Figura 3.16. Resumo informativo da Barragem UHE Salto Grande/MG, obtido do banco de informações e mapas de transportes. Fonte: Ministério dos Transportes, disponível em <http://www2.transportes.gov.br/bit/04-hidro/4-barra-eclu/barra/reg-sud/saltogrande.HTM>. Acesso em 10/3/2013.



Figura 3.17. Arranjo dos componentes da usina: localização barragem e da casa de força. Fonte: Google Earth®, acesso em 18/9/2013.



Figura 3.18. Vista em detalhe do Google Earth® na área da casa de força da Usina Salto Grande. Coordenadas: 23 K 740793.82 m E 7883867.59 m S. Fonte: Google Earth, acesso em 18/9/2013.



Figura 3.19. Vista em detalhe do Google Earth na área da barragem da Usina Salto Grande. Coordenadas: 23 K 740793.82 m E 7883867.59 m S. Fonte: Google Earth, acesso em 18/9/2013.

3.4.6.2 Método de Estatística Espacial para busca semi-automatizada de diferença de níveis altimétricos em cursos d'água

A aplicação das ferramentas de estatística focal (*focal statistics*; TOMLIN, 1990) foi utilizada para identificação localizada de diferenças de nível em cursos d'água. O processo pode ser parametrizado para definição de áreas de pesquisa e escolha de determinados canais de drenagem. Estas áreas podem variar de células próximas, para verificação de quedas abruptas, no caso de usinas por reservação com turbina/gerador próximo, ou, em distâncias maiores, para avaliação de diferenças de nível em usinas a fio d'água. No caso em estudo a usina possui um reservatório e a água para produção de energia é conduzida por um duto até a casa de força, localizada à distância.

O processo aplicado ao modelo apresentado (Figura 3.20) busca a amplitude de níveis altimétricos em regiões definidas por uma área de influência. Na identificação da diferença de nível nos cursos d'água foi aplicado o método *FocalRange* para o mapa de altimetria com máscaras sobre a área de influência dos cursos d'água selecionados.

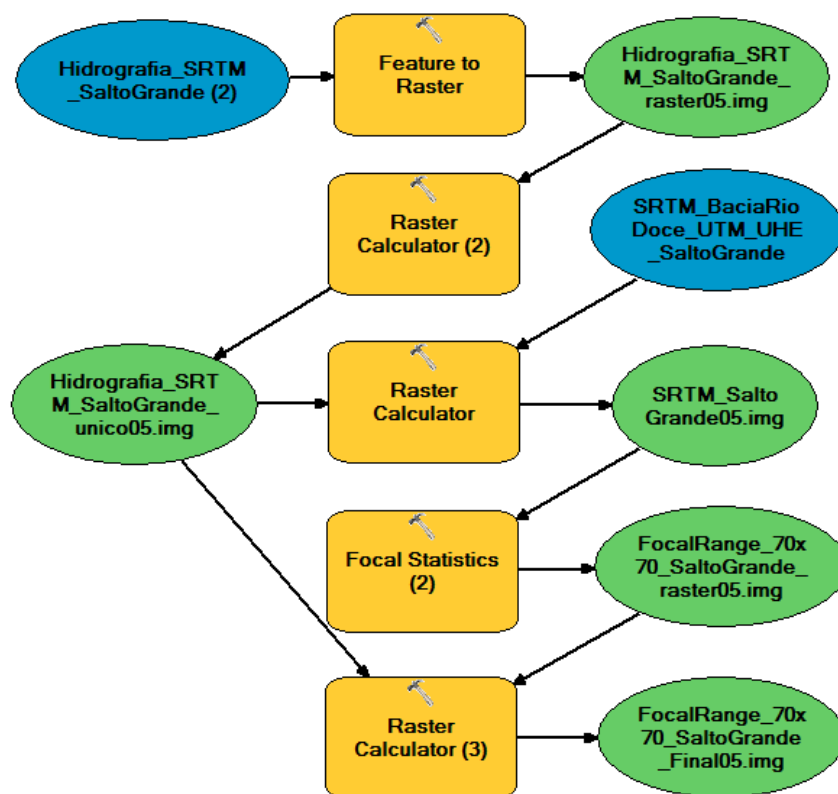


Figura 3.20. Esquema ModelBuilder/ArcGIS⁵⁶ para elaboração semi-automatizada do mapa de quedas d'água.

Os operadores do algoritmo são:

Feature to Raster: Transforma os vetores da hidrografia em imagem matricial (raster) com área de influência definida;

Raster Calculator (2): Seleciona os pixels superpostos à hidrografia e gera uma matriz de altimetria superposta à hidrografia;

Raster Calculator: Extrai os valores dos pixels do MDE sobre a área de influência da hidrografia;

FocalStatistic (2): Realiza o FocalRange dos pixels do MDE superpostos à hidrografia com a parametrização de área escolhida (ex.: 70 x 70 pixels – 6.300 x 6.300 metros). Gera uma matriz de amplitude de altimetrias na área de influência parametrizada;

Raster Calculator (3): Extrai os valores da matriz de amplitude de altimetria para os pixels localizados sobre a matriz da hidrografia.

⁵⁶ ModelBuilder, é um modelo automatizado no ArcGIS para realizar processos por meio da criação, edição e gerenciamento de modelos. Consiste em uma iteração de ferramentas e dados. Localizado em <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//002w0000007v000000>, acessado em 18/9/2013.

3.4.6 Índice Topográfico

O Índice Topográfico é uma proposta de um indicador definido pela maior queda topográfica de trechos de rios, diretamente proporcional à declividade em células vizinhas e proximidade com os canais de drenagem.

O Mapa de Índice Topográfico foi gerado pela álgebra da multiplicação dos mapas relacionados respectivamente à velocidade do fluído pela amplitude de elevação no trecho do rio, diferença de altura entre células vizinhas e proximidade do corpo d'água, conforme mapas a seguir:

- (i) Mapa de amplitude de altimetria no trecho do rio;
- (ii) Mapa de declividade máxima;
- (iii) Mapa do inverso da distância à drenagem.

A equação consiste na multiplicação da maior diferença das altimetrias no trecho do rio pela declividade entre o pixel vizinho. O resultado é multiplicado pelo inverso da menor distância euclidiana ao pixel mais próximo da drenagem considerada.

A amplitude da altimetria no trecho do rio foi calculado pelo método ZonalRange (TOMLIN, 1990). O mapa da declividade (BURROUGH, 1998) em graus foi calculado em função das taxas de variações da superfície nas direções horizontal (dz/dx) e vertical (dz/dy) do centro da célula, conforme McCoy (2001). O algoritmo usado para calculo da declividade é:

$$\text{declividade_graus} = \text{ATAN} (\sqrt{ [dz/dx]^2 + [dz/dy]^2 })$$

A distância euclidiana da drenagem (Figura 3.21) é calculada do centro de cada célula (origem) para o centro das células vizinhas (destino), pesquisando pela hipotenusa entre x_{max} e y_{max} . A célula utilizada como destino corresponde a células dos canais de drenagem. O menor valor da hipotenusa é atribuído ao valor da célula origem (Burrough, 1998).

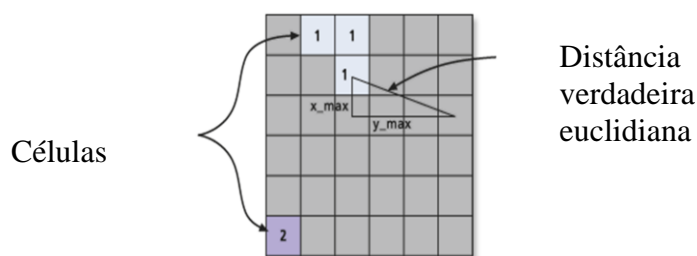


Figura 3.21. Método da menor distância euclidiana. Fonte: ESRI (2010)⁵⁷.

O Mapa de Índice Topográfico é o produto da reclassificação para 8 bits (256 níveis) do mapa de amplitude de altimetria no trecho, do mapa da declividade máxima entre células vizinhas e do mapa do inverso da distância à drenagem.

⁵⁷ Disponível em http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Calculating_slope, acessado em 16/9/2013.

3.5 ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

Antes da introdução ao método de regionalização aplicado nessa pesquisa, são apresentados breves conceitos de regionalização de vazões em conformidade com as práticas mundiais aplicadas para regionalização de vazões em etapas de prospecção de potenciais hidroelétricos, apresentadas na revisão bibliográfica. Em sentido amplo, entende-se por regionalização hidrológica qualquer processo de transferência de informações, de um local para outro, dentro de uma área de comportamento hidrológico semelhante. Essas transferências podem abranger, diretamente, as séries de vazões e, ou, precipitações ou determinados parâmetros estatísticos relevantes tais como: média, variância, máximos e mínimos e, ainda, equações e parâmetros relacionados com estas estatísticas (EUCLYDES, 1999).

Conforme Euclides (2007), as vazões nos cursos d'água podem ser avaliadas por método direto de registros de séries históricas fornecidas pelas estações fluviométricas ou por métodos indiretos tais como: modelos empíricos (ex. método racional, hidrograma unitário ou método da curva-índice); modelos matemáticos (ex. chuva-vazão), calibrado individualmente para cada bacia hidrográfica com dados hidrológicos e fisiográficos conhecidos; ou por meio de transferência de informações pluviométricas com base na área de drenagem da bacia⁵⁸.

3.5.1 Introdução

Nessa pesquisa optou-se pela regionalização por técnicas de regressão múltipla, porém, utilizando a ponderação espacial das variáveis das informações distribuídas, conforme Fotheringham *et al.* (2002) propôs para aplicações distintas do campo da hidrologia. As variáveis preditoras (explicativas) para regionalização das vazões média, vazão média de cheia e vazão mínima são propostas por Tucci (2002) na Tabela 3.6. As variáveis preditoras no modelo de regressão múltipla serão denominadas de variáveis dependentes, enquanto a variável regionalizada da vazão será denominada variável independente.

Utilizou-se o método de ajuste de equação matemática por Regressão Ponderada Geograficamente – GWR (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002) para regionalização de vazões médias de longo período e das vazões extremas. A vazão máxima diária para tempo de retorno de 500 anos $Q_{\max 500}$ foi adotado para vazão máxima. Para vazões mínimas foram adotadas a vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos - $Q_{7,10}$ e a vazão mínima com 95% de permanência – Q_{95} .

⁵⁸ HIDROTEC: Geração e transferência em recursos hídricos para o estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.hidrotec.ufv.br>>. Acesso em 29 de agosto de 2013.

Tabela 3.6. Variáveis explicativas para regionalizações de vazões médias e vazões extremas.

| Variável Regionalizada (Variável Dependente) | Variável Explicativa (Variáveis independentes) |
|---|---|
| Vazão Média | Área da bacia, precipitação |
| Vazão Média de Cheia | Área da bacia, precipitação, declividade e comprimento do rio |
| Vazão Mínima | Área da bacia e densidade de drenagem |

Fonte: Adaptado de Tucci (2002).

O método GWR no SIG ArcGIS (MITCHELL, 2005) possibilita de forma iterativa e com ferramenta de alto desempenho modelar a tendência espacial de forma contínua, com parâmetros variantes no espaço (CÂMARA *et al.*, 2002; DRUCK *et al.*, 2004).

O método GWR (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002) foi comparado ao método de transferência de informação da vazão específica utilizando a área de drenagem à montante da bacia aplicada para regionalização da vazão média de longo período – Q_{mlp} (ÁVILA *et al.*, 2003).

3.5.2 Localização espacial das informações hidrológicas

As informações hidrológicas utilizadas na bacia do rio Doce foram obtidas pelo “ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS”, do programa Hidrotec⁵⁹. São apresentadas espacialmente na Figura 3.22 as informações hidrológicas da bacia do rio Doce obtidas do programa Hidrotec (517 pontos em verde), a localização das estações fluviométricas da ANA (186 triângulos em azul) e a simulação das estações da ANA (161 pontos em vermelho).

A simulação das estações da ANA estão mais próximas às estações do Hidrotec a uma distância máxima de 5 quilômetros. Essas simulações das estações da ANA possuem informações hidrológicas do Hidrotec de vazões médias e vazões extremas (mínimas e máximas) para serem regionalizadas pelo GWR.

⁵⁹ ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS, disponível em http://www.hidrotec.ufv.br/metodologia_resultados.html, acessado em 29/8/2013.

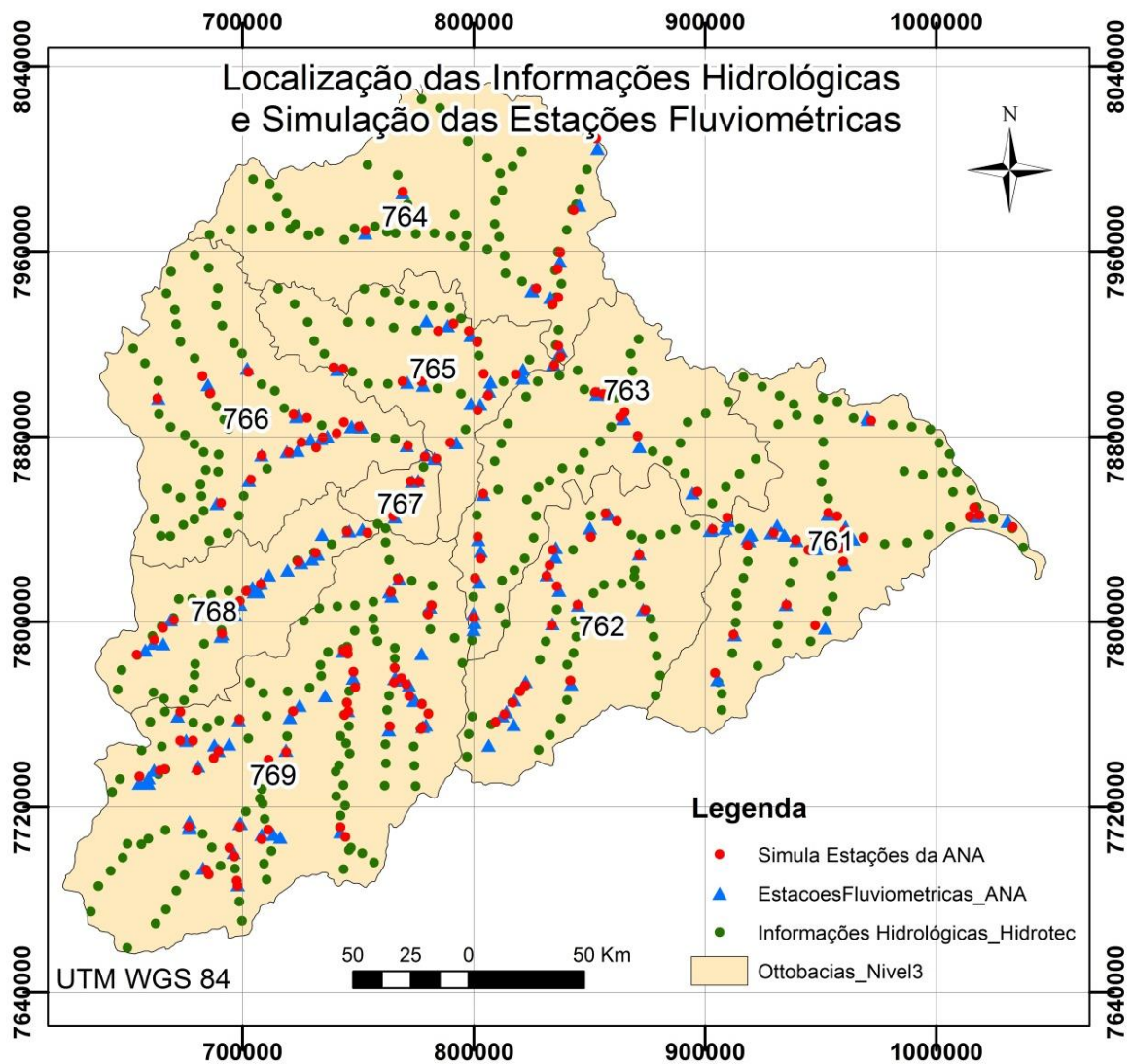


Figura 3.22. Mapa de localização das estações fluviométricas da ANA e das informações hidrológicas do Hidrotec.

Os pontos em vermelho da simulação das estações da ANA foram deslocados para tocar os vetores mais próximos que representam os canais de drenagem gerados pelo ArcHydro (MAIDMENT, 2002). Todos os pontos do Hidrotec também foram deslocados para os vetores da hidrografia gerada pelo ArcHydro. As informações extraídas dos mapas com variáveis independentes foram adicionadas às informações hidrológicas do Hidrotec.

Os 517 pontos em verde com informações de vazões do Hidrotec são utilizados para validação dos processos e dos resultados. Na validação dos dados foram retirados pontos com informações nulas, conforme Figura 3.23.

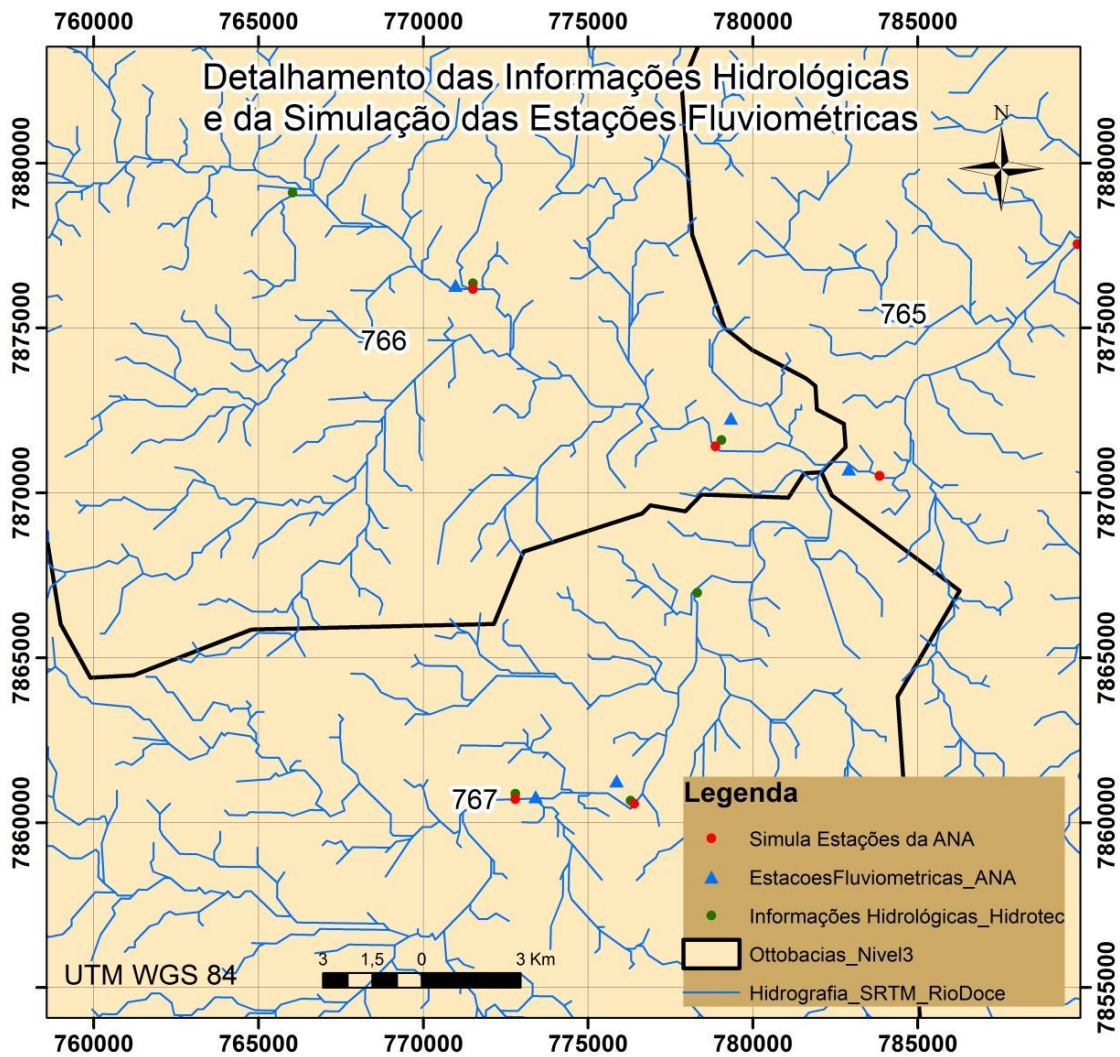


Figura 3.23. Mapa de localização das estações fluviométricas da ANA e das informações hidrológicas do Hidrotec.

3.5.3 Proposta de elaboração de mapa de dados distribuídos de Vazão Média de Longo Período – Q_{mlp}

Em locais com registros de séries históricas a vazão média de longo período (Q_{mlp}) pode ser determinada pela média das vazões médias anuais para uma série de dados. Segundo Tucci (2002), a média das vazões da série de registros disponível num local representa Q_{mlp} como:

$$Q_{mlp} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Q_t$$

Onde: Q_t é a vazão do intervalo de tempo t (anos); N é o número de intervalos t ; e Q_{mlp} é a vazão média de longo período (m^3/s). Pela fórmula a determinação de Q_{mlp} somente seria possível com um registro longo de séries históricas superiores a 25 anos.

Em locais com pouca disponibilidade de dados, como é o caso de grande parte das sub-bacias hidrográficas brasileiras, as metodologias de predição das variáveis da vazão média em potenciais hidroelétricos recomendam a aplicação da variável área à montante do local estudado (ÁVILA *et al.*, 2003; YI *et al.*, 2010) e a interpolação da relação vazão média por área a montante das bacias hidrográficas mais próximas (ELETROBRÁS, 2007). Por meio de ferramentas em SIG a variável de área a montante pode ser obtida por metodologia apresentada por Maidment e Djokic (2000).

Os métodos empíricos recomendados em Eletrobrás (2000), para o caso de Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCH, utilizam a equação de correlação definida por:

$$Q_1 = \frac{A_1}{A_2} \times Q_2,$$

Onde: A_1 é área de drenagem do local do aproveitamento, em km^2 ; A_2 é a área de drenagem do posto existente, em km^2 ; Q_1 é a vazão do local do aproveitamento, em m^3/s ; e Q_2 é vazão do posto existente, em m^3/s .

Essa forma simplificada de estimar vazão média pode incorrer em erros quando não existem informações próximas, ou quando há heterogeneidade de bacias próximas. Bacias pequenas tendem a ser mais homogêneas. Porém, uma pequena heterogeneidade pode ter um efeito maior do que teria se a bacia fosse maior, pois essa alteração seria desconsiderada.

Nesse estudo a determinação da vazão média de longo período em processo automatizado no SIG é proposta por meio da estimativa da vazão específica e do conhecimento da área de contribuição (área de drenagem). A área de contribuição pode ser obtida por meio da derivação do Modelo Digital de Elevação - MDE. A solução é representada pela equação matemática a seguir:

$$\bar{Q}_{mlp} = \bar{Q}_{esp} \times Ai$$

Onde: \bar{Q}_{mlp} é a vazão média de longo período em litros por segundo, $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$; \bar{Q}_{esp} é a vazão específica média plurianual $\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (litros por segundo por quilômetros quadrados) e Ai é a área drenagem da estação ou de um local da bacia, km^2 .

O conhecimento da área de drenagem a montante é obtido por meio de análises hidrológicas a partir do MDE (MAIDMENT, 2002). A vazão específica de longa duração corresponde a relação da série de vazões medidas mensalmente ou diariamente em períodos longos (acima de 25 anos) sobre a área da bacia a montante. Apesar de existirem informações de vazão específica em trechos de otobacias das bacias hidrográficas brasileiras, a variabilidade espacial da vazão específica na bacia hidrográfica pode não implicar em um método apropriado para estimativa de vazões médias específicas de longa duração para prospecção de potenciais. Essas incertezas poderiam ser verificadas por comparações com valores medidos nas bacias brasileiras.

São avaliados a seguir dois métodos apropriados para estimativa de Q_{mlp} em fase de prospecção de potenciais hidroenergéticos:

- Método baseado na determinação da vazão específica (ÁVILA *et al.*, 2003);
- Método com aplicação de regressão múltipla baseado em Regressão Ponderada Geograficamente (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002)

Os dois métodos têm como característica a possibilidade da geração de informações distribuídas em modelos matriciais de fácil utilização em ambiente SIG.

3.5.3.2 Regionalização da vazão específica de longa duração na sub-bacia hidrográfica

As informações pontuais de vazão específica conhecidas são interpoladas no SIG por método Kernel (ESRI, 2002) considerando as fronteiras (barreiras) das sub-bacias como limites, de forma que informações pontuais de vazões específicas de uma sub-bacia não influenciem em uma sub-bacia mais próxima.

A variação da vazão específica na sub-bacia é avaliada por meio do diagrama de caixa (BoxPlot) para captar as variações do conjunto de dados. A baixa variabilidade da vazão específica na sub-bacia associado aos baixos valores de resíduos de Q_{mlp} pode indicar a aplicabilidade do método Kernel (SILVERMAN, 1986) de regionalização local.

Foram verificadas as relações entre as precipitações médias anuais e vazão específica média de longa duração entre os dados georreferenciados do Hidrotec e os dados calculados pelo procedimento proposto. Os resultados foram avaliados em relação ao estudo PRUSKI *et al.* (2004) para sub-bacias da bacia do rio São Francisco.

3.5.3.3 Cálculo da vazão média de longo período (Q_{mlp}) pelo método da vazão específica

Com base na informação distribuída de vazão específica e nas informações distribuídas de área de drenagem a montante, as matrizes foram multiplicadas para cada célula, para solução da equação $\bar{Q}_{mlp} = \bar{Q}_{esp} \times Ai$.

As informações hidrológicas dos outros pontos conhecidos do Hidrotec são utilizadas para a validação do método adotado para cálculo da vazão específica por análise espacial com interpolação local Kernel (CAMARGO *et al.*, 2001; Silverman, 1986) e da aplicabilidade para cálculo de vazão média de longo período conforme a equação $\bar{Q}_{mlp} = \bar{Q}_{esp} \times Ai$.

3.5.3.4 Aplicação da regressão ponderada geograficamente para determinação de Q_{mlp}

A regressão ponderada geograficamente (Geographically Weighted Regression - GWR) proposta por Fotheringham *et al.* (2002) foi aplicada na regionalização de vazão média

de longo período no sentido de comparar os resultados obtidos com os resultados obtidos da equação empírica $\bar{Q}_{mlp} = \bar{Q}_{esp} \times Ai$.

A vantagem metodológica da utilização de um método robusto de regressão multivariada de dados para regionalização que utiliza um fator espacial (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002; CÂMARA *et al.*, 2002; DRUCK *et al.* 2004) é aplicação do mesmo método por análises complexas com o conhecimento imediato dos resíduos para cada localidade da bacia hidrográfica, e não somente do rio estudado. Esse método pode ser aplicado a outras bacias hidrográficas brasileiras que possuam as variáveis estudadas nesse trabalho. O conhecimento das incertezas da predição das vazões em toda a bacia hidrográfica pode facilitar a tomada de decisão dos planejadores do setor elétrico e da comunidade interessada no sentido de avançar nos estudos para determinação mais acurada das vazões para viabilidade do potencial.

Para avaliação da capacidade do método de regionalizar a variável dependente Q_{mlp} foram utilizados somente os dados de entrada das localidades que simulam as estações fluviométricas da ANA. No caso em estudo foram utilizados 161 locais com Q_{mlp} conhecidas.

Os dados das variáveis independentes estão distribuídos em toda a bacia hidrográfica em modelos matriciais. Foram simuladas várias composições para a adequada escolha das variáveis independentes na aplicação do método GWR. Inicialmente foram avaliadas por ajustes dos mínimos quadrados (Ordinary Least Squares – OLS) as maiores correlações entre as variáveis utilizadas. Confirmou-se a tendência das maiores correlações das variáveis apontarem para as indicadas por TUCCI (2002). Porém, verificou-se que a inserção de outras variáveis ao modelo, desde que cumprindo os requisitos verificação da colinearidade (MITCHELL, 2005), em algumas situações, aumentou levemente a correlação geral ajustada do modelo (R^2 Ajustado), sem prejuízo relevante ao tempo de processamento do modelo. Porém, somente a elevação do coeficiente de ajuste do modelo pode indicar uma falsa impressão de melhoria do modelo. Os aumentos de desempenho dos modelos somente serão verificados com os resultados dos indicadores gerais do modelo GWR, orientados pelos parâmetros da Tabela 3.7.

No sentido de definir outras variáveis para aumento do desempenho do modelo de regressão, foram inseridas para as predições de vazões mínimas, as variáveis de comprimento do rio a montante e precipitação do trimestre mais seco. No modelo de predição da vazão máxima foi utilizada a variável de precipitação do trimestre mais chuvoso do AMBData.

Para melhor aplicação do modelo GWR verifica-se a relevância da densidade de informações conhecidas de Q_{mlp} , a necessidade de ajuste dos métodos e parâmetros da largura de banda (“bandwidth”) em função da disposição espacial da variável dependente, a verificação de ocorrências de colinearidades que impedem o

processamento do modelo, os coeficientes de correlações locais e correlações gerais modelo e os desvios padrões dos resíduos.

Tabela 3.7: Nomenclatura adotada para o relatório de sumário estatístico do modelo GWR.

| Modelo / Parâmetro | Nomenclatura |
|-------------------------------|---|
| Largura de Banda | Número de vizinhanças utilizadas para cada local da estimativa. Controla o grau de suavização do modelo. Pode ser aplicada uma função Kernel fixa ou variável em função de um número específico de vizinhanças. Os métodos ACC corrigido e Validação Cruzada – CV (“Cross Validation”), utilizados na largura de banda, aplicam uma ótima distância fixa ou um ótimo número de vizinhanças. |
| Resíduos ao Quadrado | Soma dos quadrados das diferenças entre valores observados e valores estimados calculados pelo GWR. |
| Número Efetivo de Vizinhanças | Reflete a troca da variância entre os valores ajustados e o desvio no coeficiente de estimativa. Está relacionada também à escolha da largura de banda. O número efetivo é utilizado para avaliar as mensurações em relação ao número de observações. |
| Sigma | Raiz quadrada da soma dos quadrados dos resíduos normalizados |
| AICc | Medida de desempenho de um modelo usada para comparar diferentes modelos de regressão. É um método para determinar o melhor ajuste dos dados observados. Comparando o valor de AICc do GWR com o ajuste do modelo de regressão global por dos mínimos quadrados – OLS, é possível verificar os benefícios da regressão local sobre a regressão global. |
| R^2 | É a medida de correlação ou do ajuste do modelo. O denominador é a soma dos quadrados dos valores das variáveis dependentes enquanto o numerador é a soma dos quadrados dos resíduos, que calcula a parte que não é explicada pelo modelo. O valor varia de 0 a 1, de forma que quanto maior mais a variável dependente é explicada pelas variáveis independentes (regressores/preditores) |
| R^2 Ajustado | É medida de ajustada do modelo considerando os valores os valores normalizados do numerador e denominador por seus graus de liberdade. Esse valor penaliza a inclusão de regressores pouco explicativos. |
| Variável Dependente | Variável utilizada para regionalização |
| Variável Independente (1 a n) | Variáveis predictoras do modelo de regressão |

Fonte: Fotheringham *et al.* (2002) e Mitchell (2005).

Ao final um relatório do sumário estatístico do modelo é apresentado em conjunto com os parâmetros adotados. O mesmo procedimento foi utilizado para avaliação dos resultados da aplicação do modelo GWR para vazões extremas. A nomenclatura do resumo estatístico do modelo GWR está apresentada na Tabela 3.7.

Para todos os modelos foram utilizados o tipo de Kernel fixo. Para método da largura de banda foi utilizado o Akaike Information Criterion – AICc (AKAIKE, 1973; GASSER e MILLER, 1979; HURVICH e TSAI, 1991) devido os melhores ajustes das combinações das variáveis com os resultados.

Foram definidas como variáveis independentes do modelo de regressão a área de drenagem da bacia a montante e a precipitação média anual, conforme orientações em Tucci (2002) descritos na Tabela 3.6.

A Figura 3.24 apresenta a localização geográfica da variável independente de precipitação média anual nas sub-bacias e a Figura 3.25 representa a área de drenagem a montante da bacia. A precipitação média anual para séries históricas superiores a 25 anos foi obtida do AMBData do INPE⁶⁰.

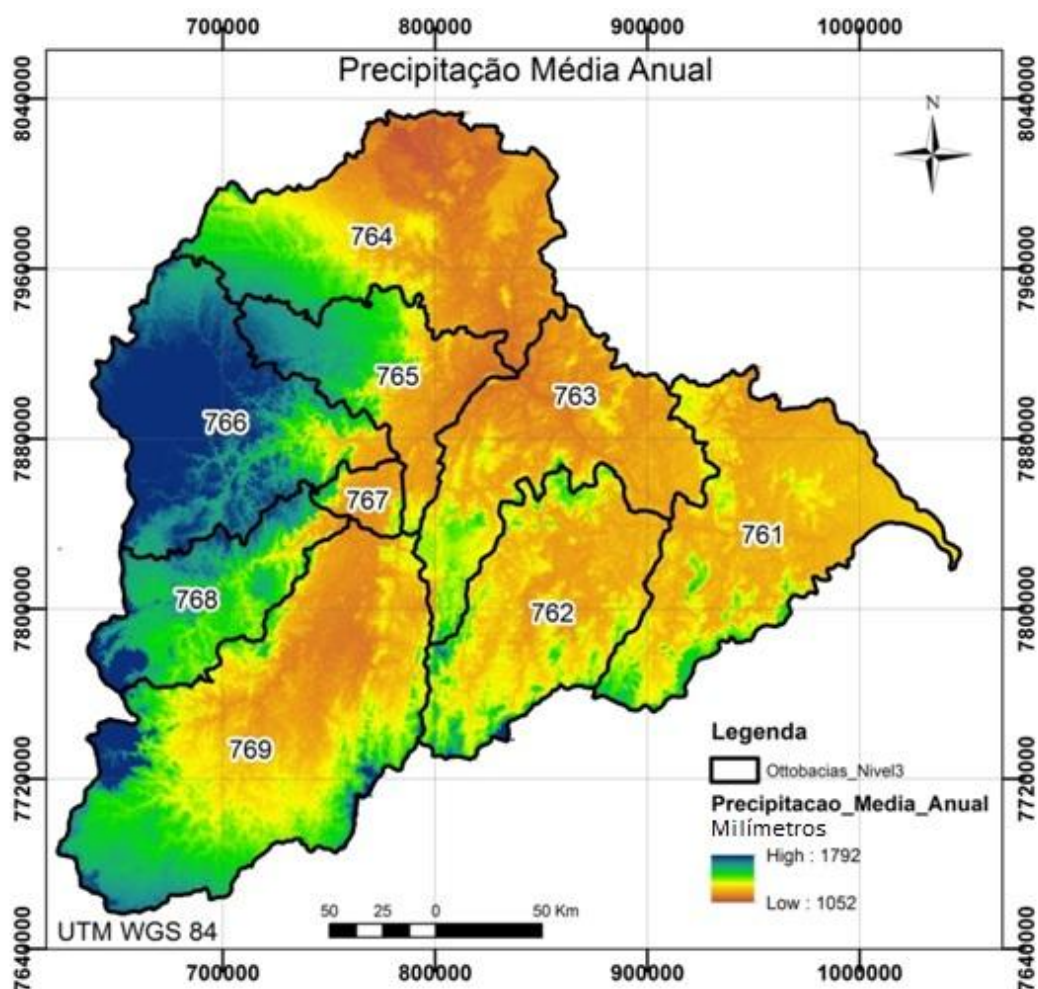


Figura 3.24. Informações de Precipitação Média Anual. Fonte: AMBData/INPE.

⁶⁰ Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/>. Acesso em 29/9/2013.

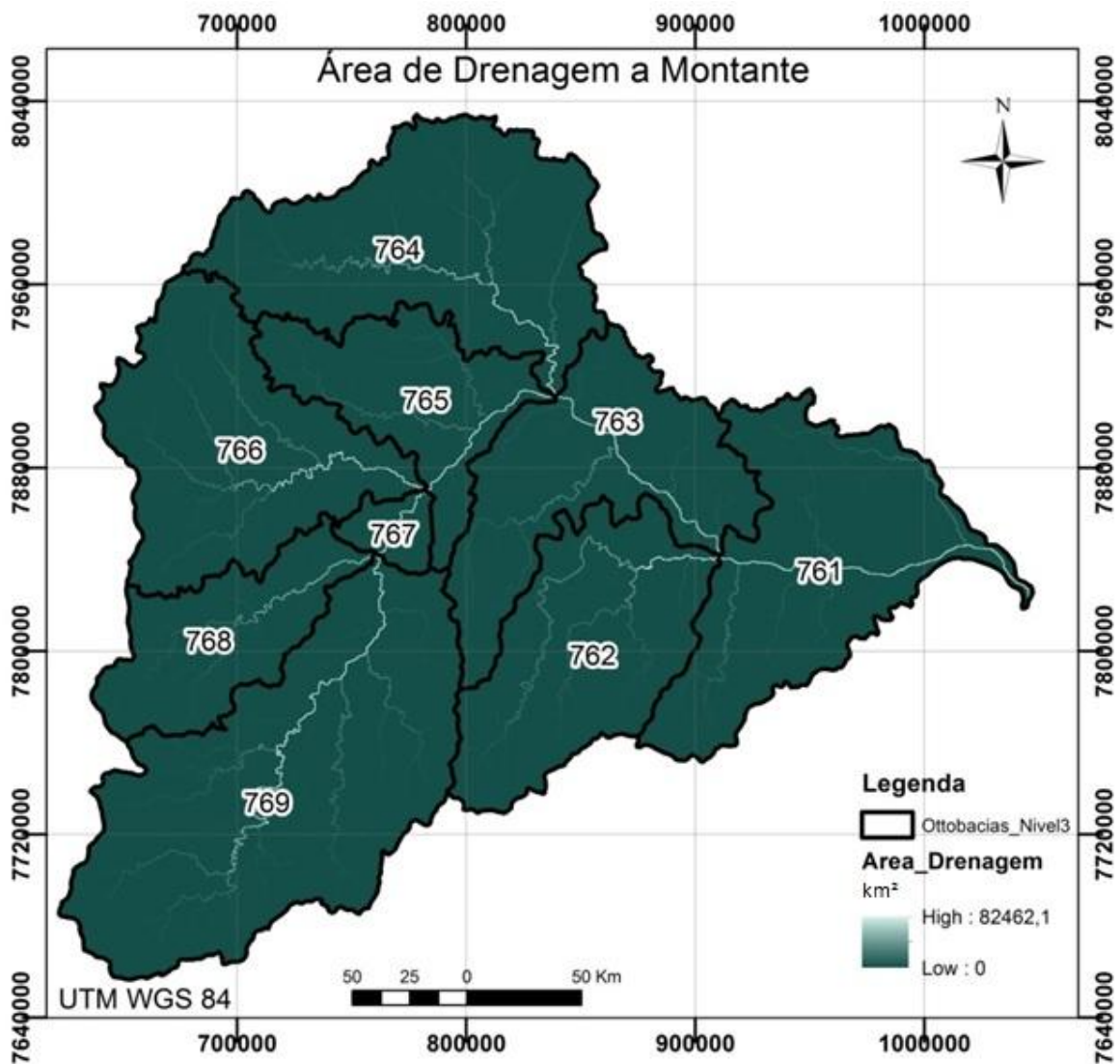


Figura 3.25. Informações distribuídas de área de drenagem a montante.

3.5.4 Proposta de elaboração de mapa de dados distribuídos de vazão máxima com período de retorno de 500 anos (Q_{max500})

Seguindo o procedimento adotado na aplicação do método GWR para Q_{mlp} , as variáveis independentes da regressão para estimativa de Q_{max500} foram área de drenagem da bacia a montante (Figura 3.25), precipitação média dos 3 meses mais chuvosos (Figura 3.26), declividade média no trecho de rio (Figura 3.27) e comprimento do rio à montante (Figura 3.28) em quilômetros.

A Figura 3.29 apresenta a localização geográfica da variável dependente Q_{mlp} e das variáveis dependentes para predição.

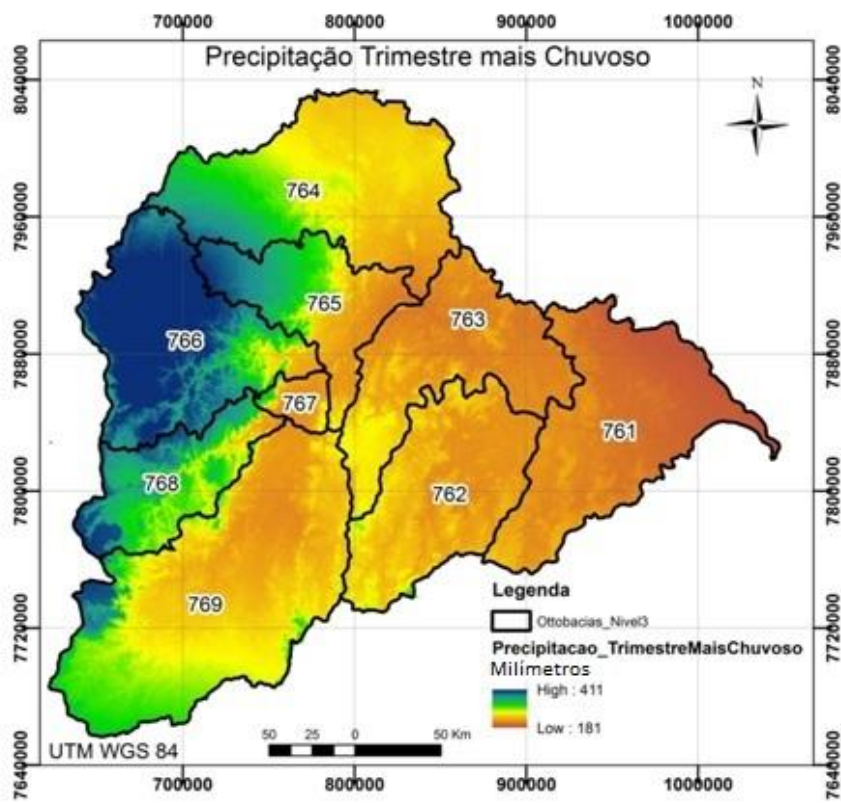


Figura 3.26. Informações distribuídas de precipitação do trimestre mais chuvoso. Fonte: AMBData/INPE.

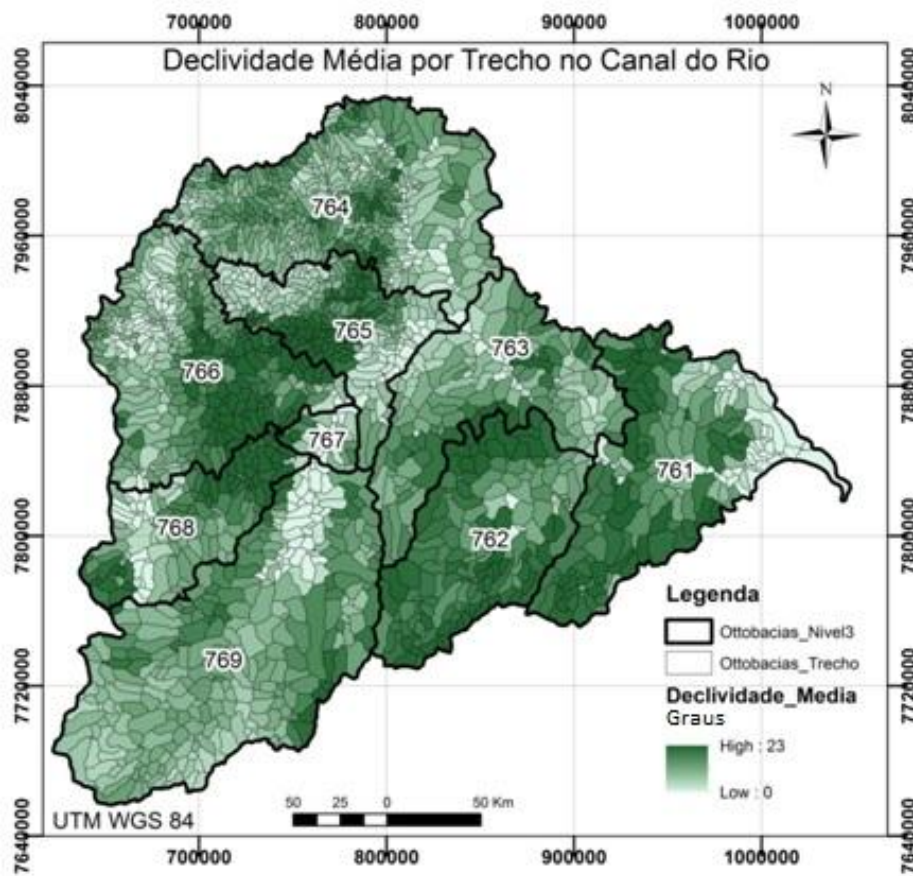


Figura 3.27. Informações distribuídas de declividade média por trecho de canal de rio.

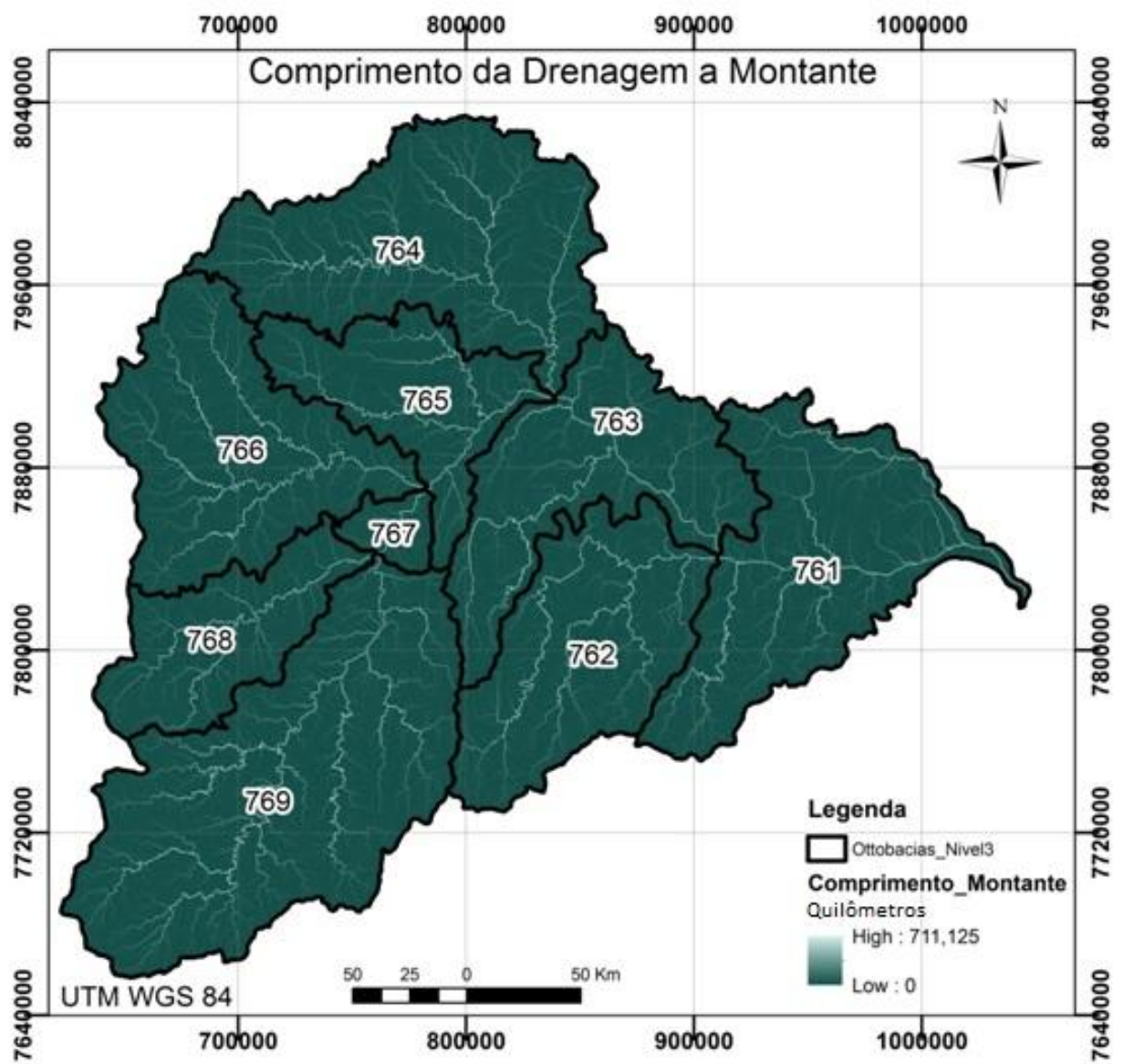


Figura 3.28. Informações distribuídas de comprimento da drenagem à montante.

Os 186 dados preditores da vazão máxima ($Q_{\max500}$) estão apresentados na Figura 3.29 para a bacia com área de drenagem estimada de 82.462,1 Km² conforme dados da ANA.

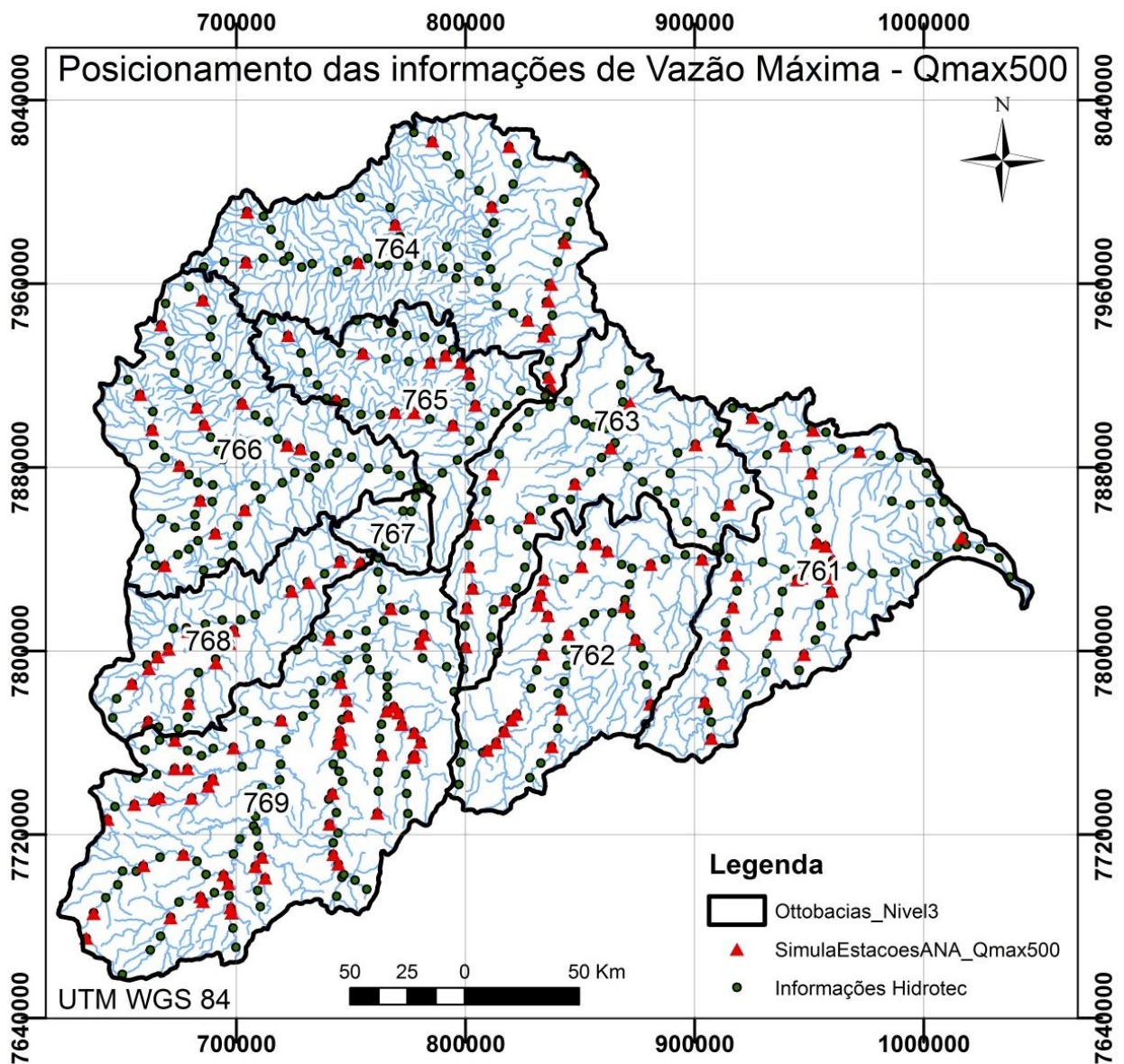


Figura 3.29. Posicionamento das estações com informações de $Q_{\max500}$.

3.5.5 Proposta de elaboração de mapa de dados distribuídos de vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e da vazão mínima para Curva de permanência para 95% de probabilidade (Q_{95})

Os mesmos procedimentos adotados para regionalização da vazão média de longo período e da vazão máxima de 500 anos foram utilizados para avaliação das predições das vazões mínimas. Os métodos e parâmetros aplicados na determinação da largura de banda (“bandwidth”) das modelagens anteriores foram utilizados na modelagem das vazões mínimas. As variáveis independentes na aplicação do método GWR para estimativa das vazões mínimas $Q_{7,10}$ e Q_{95} foram área de drenagem da bacia a montante (Figura 3.25), precipitação média dos 3 meses mais secos (Figura 3.31), densidade de drenagem (Figura 3.30) e comprimento do rio a montante (Figura 3.28).

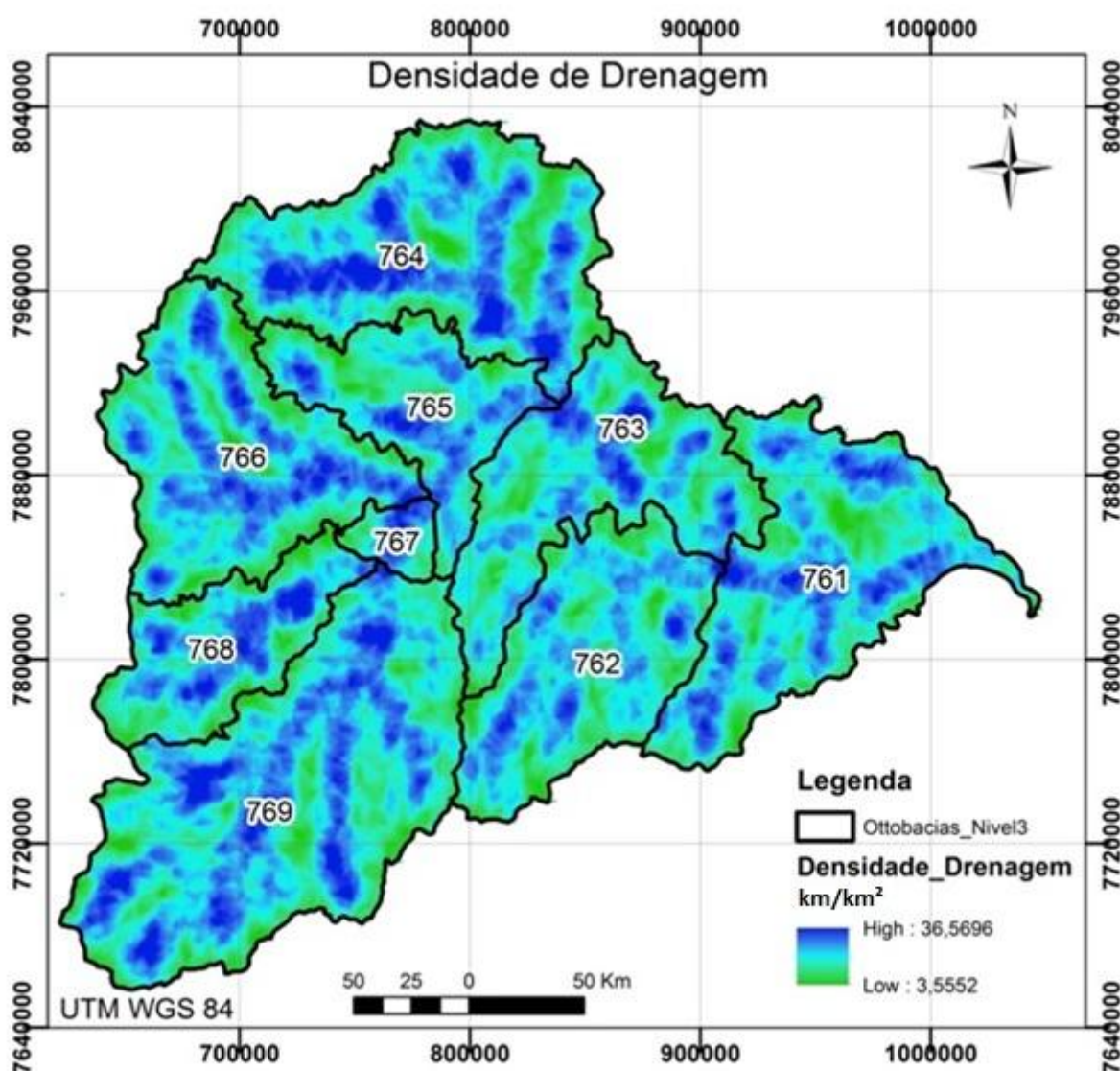


Figura 3.30. Informações distribuídas de densidade de drenagem. Fonte: AMBData/INPE.

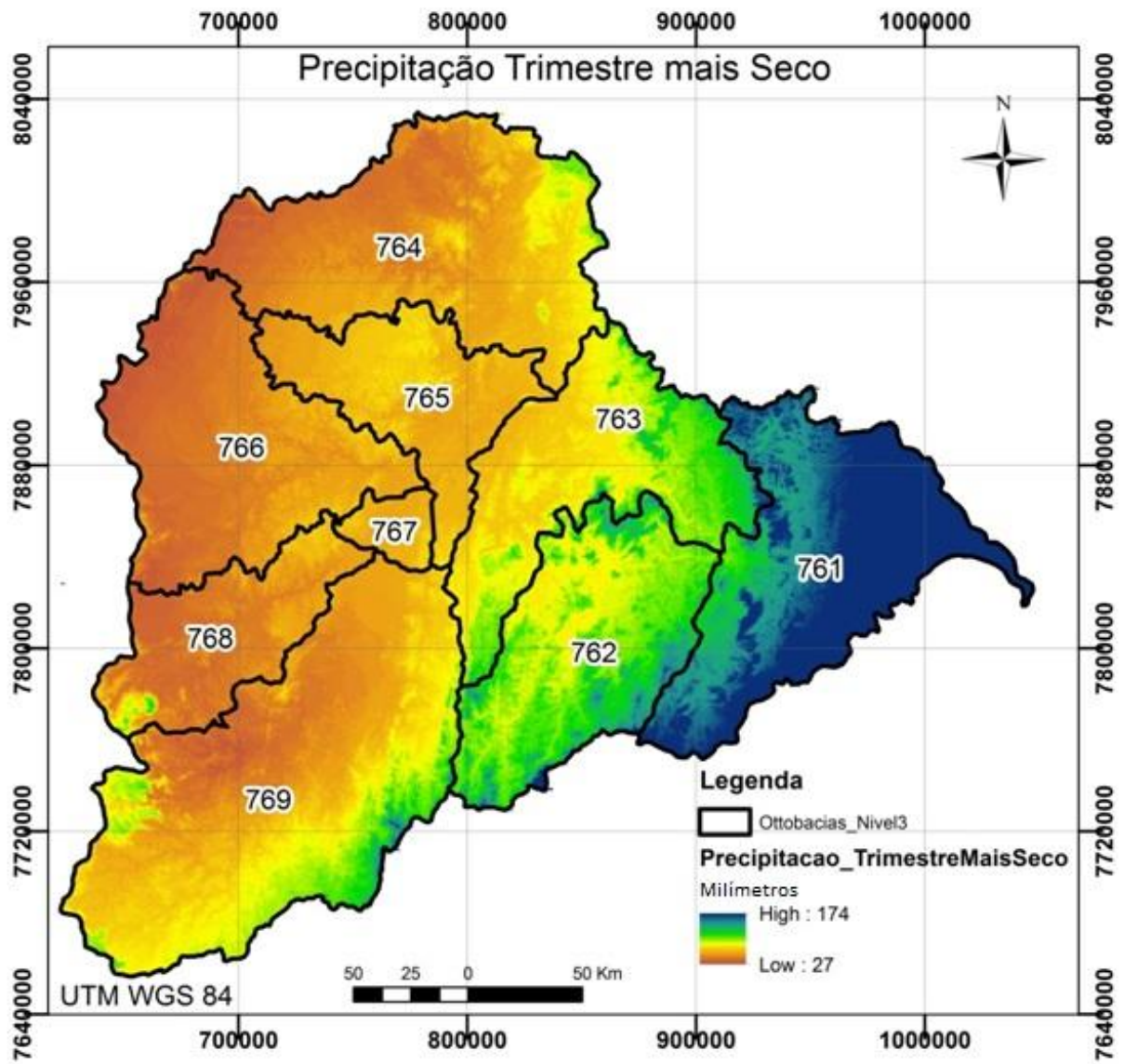


Figura 3.31. Informações distribuídas de precipitação do trimestre mais seco. Fonte AMBData/INPE.

Os 161 dados preditores (em vermelho) da vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e vazão mínima de curva de permanência para 95% de probabilidade (Q_{95}) estão apresentados na Figura 3.32 para a bacia com área de drenagem estimada de 82.462,1 km² conforme dados da ANA.

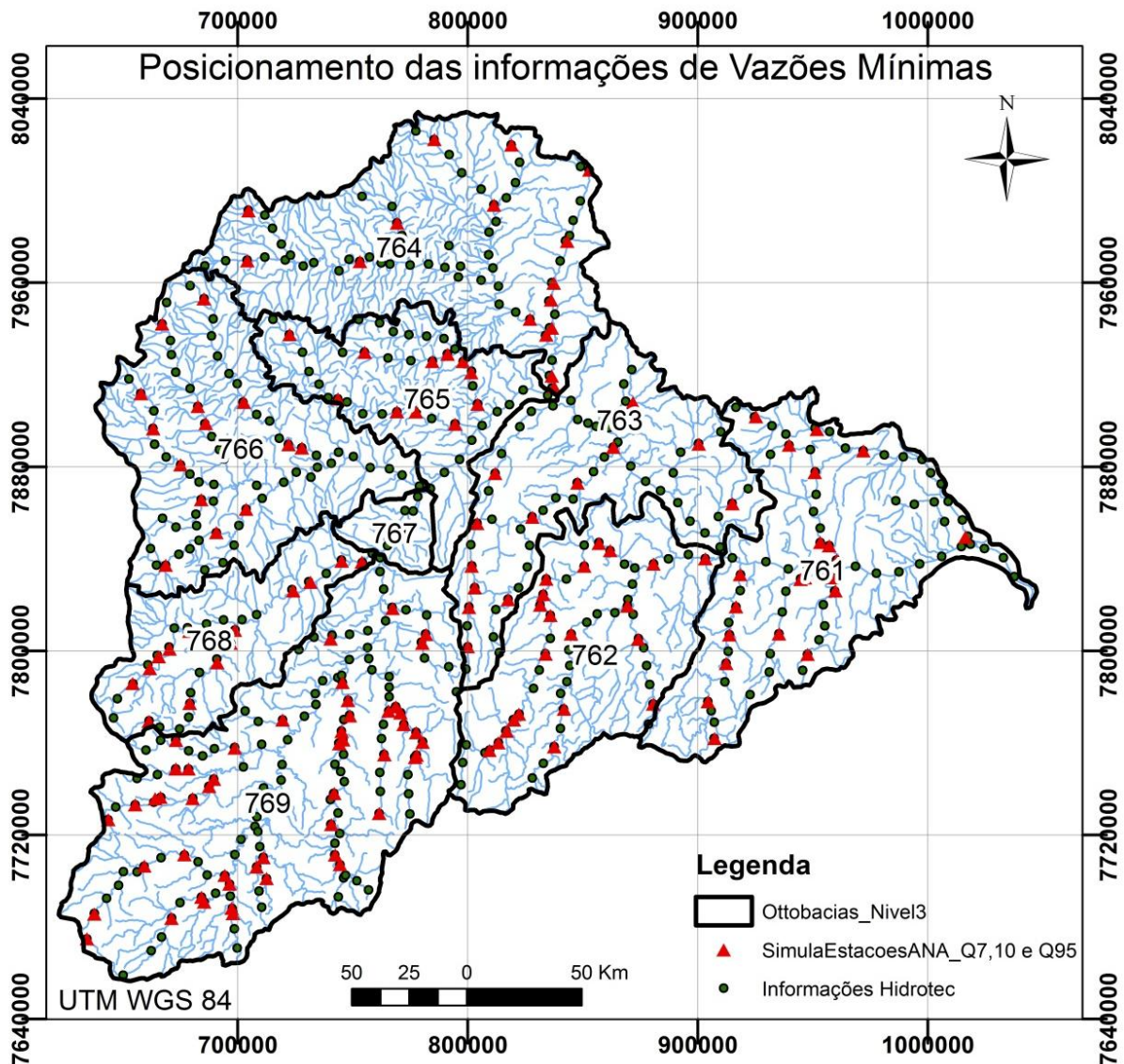


Figura 3.32. Posicionamento das estações com informações de $Q_{7,10}$ e Q_{95} .

3.6 PROPOSTA DO MAPA DE FAVORABILIDADE AO POTENCIAL BRUTO

O Mapa de Favorabilidade ao potencial bruto indica os locais com maiores favorabilidades às energias cinética e potencial mais próximos às drenagens. Esse mapa é gerado por processos automatizados de análises estatísticas, análises espaciais e álgebra de mapas.

O mapa não tem a função de indicar valores de potências, mas de indicar, favorabilidades às vazões e aos indicadores de diferenças de altimetria mais próximos

aos canais de drenagem. Os mapas que indicam a favorabilidade ao potencial hidroelétrico são: (i) mapa de vazão de longo período, (ii) mapa de amplitude máxima de altimetria em escala de trecho de ottobacia, (iii) mapa de altura de quedas em uma área de proximidade da cada célula da matriz de altimetria e (iv) mapa das regiões mais próximas aos canais de drenagens gerados pelo método D8 (TARBOTON, 1997) a partir do MDE/SRTM. A composição dos mapas está indicada na Figura 3.33.

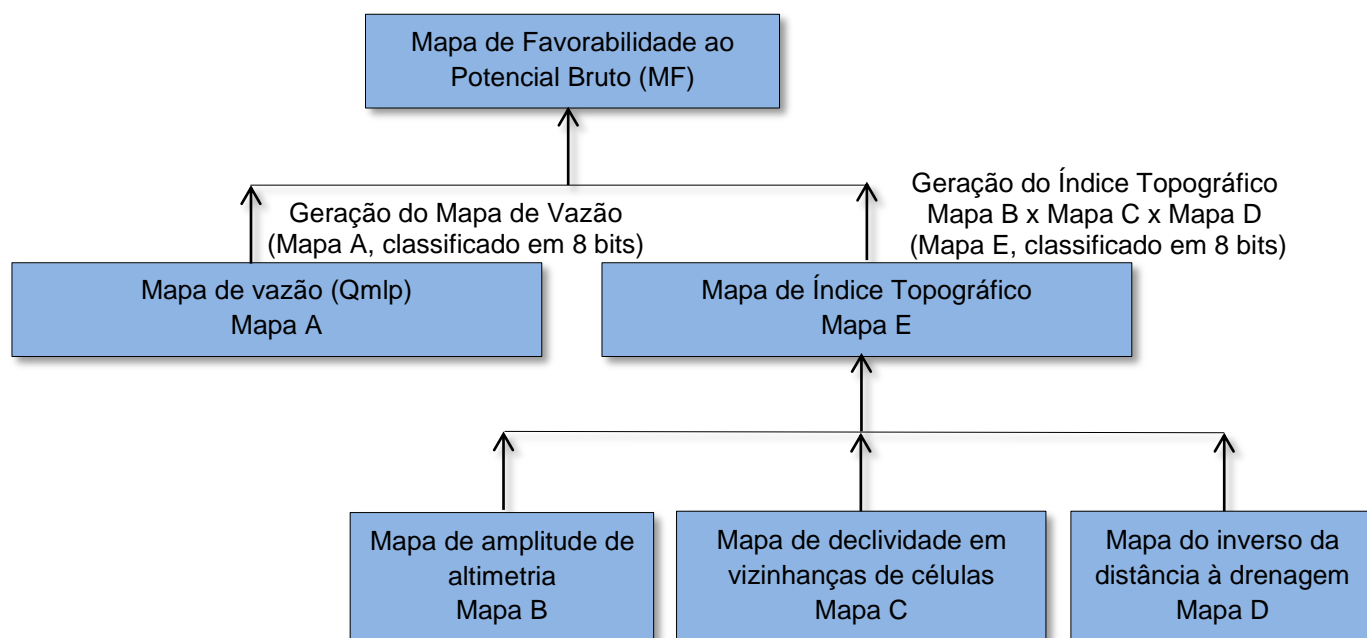


Figura 3.33. Fluxo Metodológico dos processos aplicados para o mapa de favorabilidade ao potencial bruto hidroelétrico.

- Mapa de vazão (média ou firme) – Mapa A
- Mapa de amplitude de altimetria no trecho do rio (TOMLIN, 1990) – Mapa B;
- Mapa de declividade (BURROUGH, 1998) – Mapa C;
- Mapa do Inverso da distância à drenagem (interpolação de distância euclidiana) – Mapa D.

Os mapas A e E são reclassificados linearmente em 8 bits (256 tons de cinza) para que seus produtos possam indicar as áreas com maiores favorabilidades de vazão (média de longo período – Q_{mlp} ou vazão firme natural - Q_{95}) e de altimetria em escala de sub-bacia hidrográfica para regiões próximas às drenagens. A conversão de medidas quaisquer para 8 bits deve-se a padronizar os mapas para controlar a álgebra de mapas.

Os mapas A, B, C, D e E foram gerados para todo o Brasil e recortado para a bacia do rio Doce. Foram realizadas inferências estatísticas com classes dos aproveitamentos hidroelétricos (PCH e UHE) existentes no Brasil, extraídos do SIGEL.

Ao final das avaliações são verificadas a correlação de uma curva de regressão entre classes de potências outorgadas e valores indicativos do mapa de favorabilidade para aproveitamentos hidroelétricos em todo o país.

Os dados aproveitamentos hidroelétricos do SIGEL, procuram indicar a localização da casa de força para cada empreendimento e atributos dos potenciais hidroelétricos. Porém, algumas coordenadas de pontos resultam em localizações a longas distâncias dos canais de drenagem. Isso pode ser devido a pouca padronização de posicionamento da casa de força em locais comunicados por adutoras. As tomadas de água e o canal de adução não são apresentados no sistema do SIGEL.

Para estudar essas condições que poderiam resultar em dispersões estatísticas e “outliers”, foram classificadas as amostras para análises. Para aumentar a quantidade das amostras a partir dos 2266 pontos de aproveitamentos hidroelétricos estimou-se uma área de influência de 3 quilômetros de raio para obtenção do maior número digital o Mapa de Favorabilidade (MF) para cada ponto.

3.7 ANÁLISES ESPACIAIS COM TEMAS DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE

As informações espaciais de domínio público das infraestruturas existentes, dos aspectos legais relacionados ao meio ambiente e das minorias raciais (terras indígenas e quilombolas) conforme Figura 3.34 foram utilizadas para análises espaciais integradas com as informações do potencial bruto hidroelétrico.

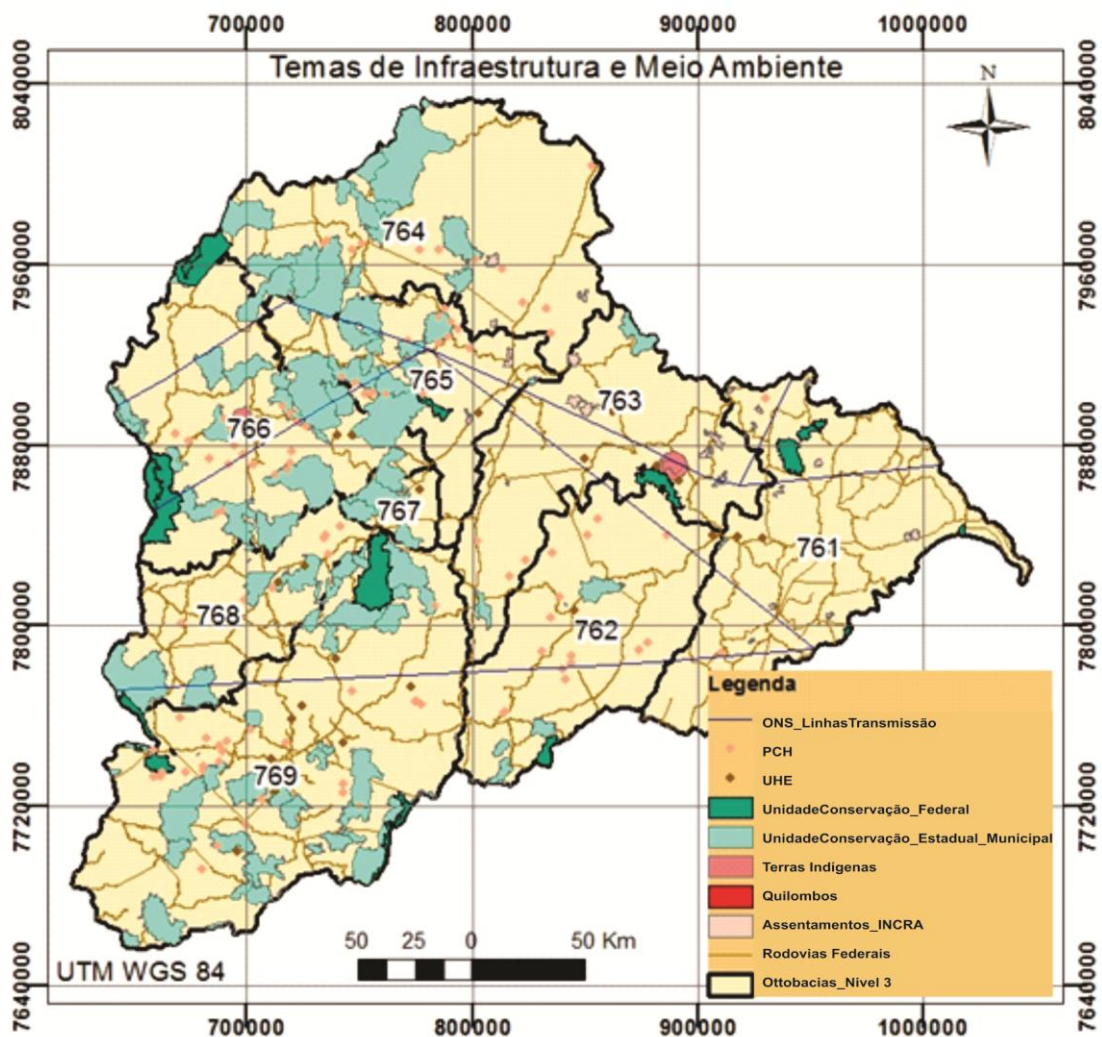


Figura 3.34. Informações espaciais de temas de infraestrutura, unidades de conservação e minorias raciais.

A Figura 3.35 apresenta a distribuição espacial da distância euclidiana às linhas de transmissão obtidas do mapa vetorial da ONS, extraído do SIGEL.

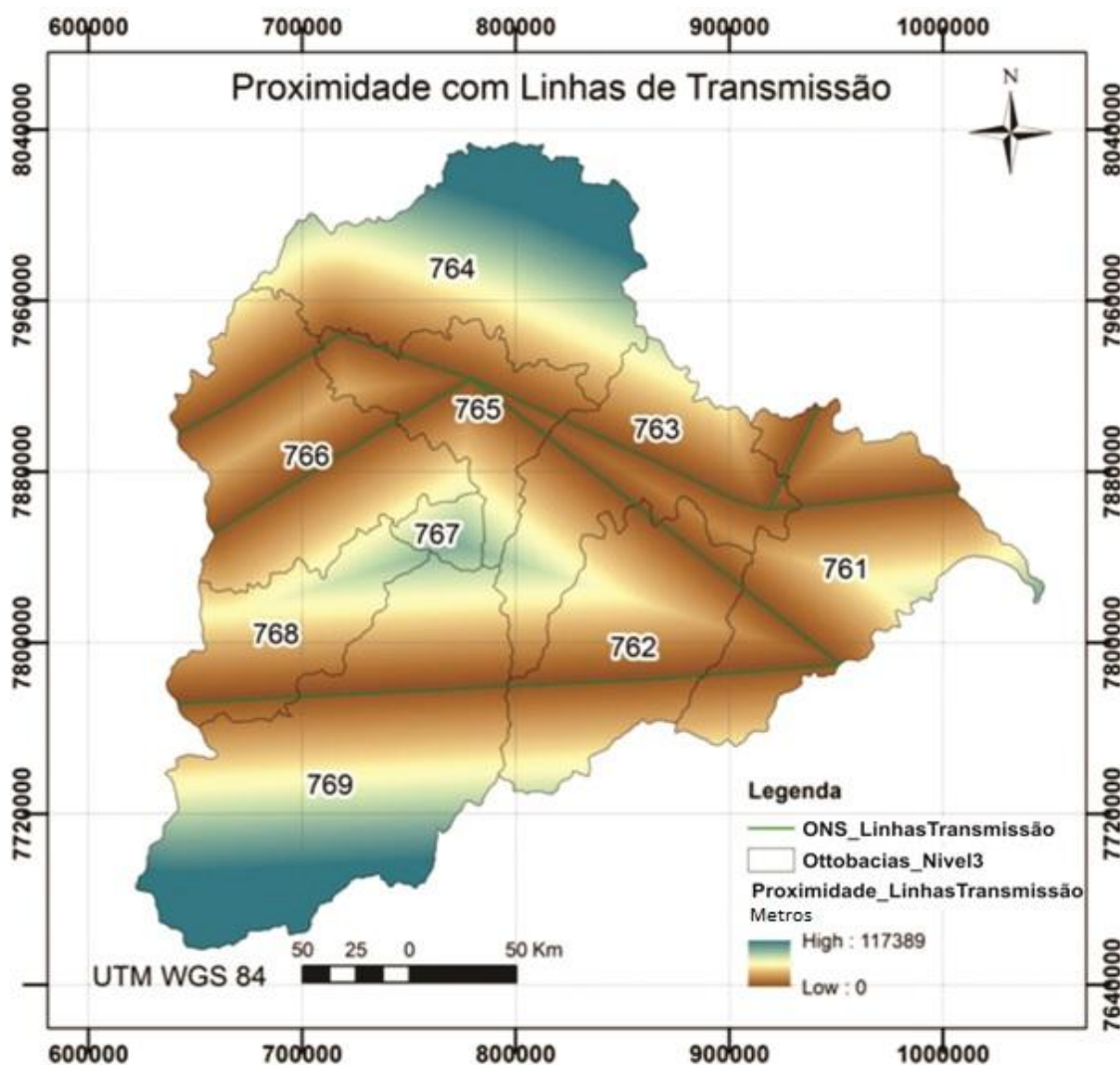


Figura 3.35. Mapa de dados distribuídos das distâncias euclidianas às linhas de transmissão.

3.8 ANÁLISES E CONSULTAS EM PLATAFORMA DE SIG

Pode-se elencar 4 (quatro) principais benefícios das análises e consultas em ambiente SIG no contexto da avaliação de potenciais hidroelétricos: (i) gerar de mapas de abrangência nacional para apoiar estudos de potenciais hidroelétricos; (ii) ampliar o conhecimento dos especialistas sobre os potenciais avaliados; (iii) facilitar a comunicação do projeto ou dos grupos de projetos (portfólios); (iv) fornecer informações para apoiar as decisões por meio da integração dos dados em análises multicritério. Além disso, é possível quantificar erros, separá-los, e repetir os processos devido o controle matemático e geográfico. Esses benefícios são descritos brevemente a seguir.

A disponibilidade de dados no ambiente SIG possibilita análises complexas para geração de informações apresentadas em forma de mapas. A imensa quantidade de dados tratados por processos bem definidos, automatizados em ambiente SIG, possibilita uma rápida geração de mapas em escala de bacias com informações

distribuídas para todo o território nacional. As metodologias aplicadas possibilitam atualizações rápidas dos mapas na medida que novas informações são atualizadas. Alguns desses mapas possuem pouca variação ao longo do tempo, por exemplo, altimetria na escala do SRTM, mapas derivados da altimetria, mapas de infraestrutura de transportes rodoviário, ferroviário, aquaviário e aeroportuários, mapas de áreas de preservação ambiental etc. Outros dados e informações podem ser atualizados com frequência (ex. modelos altimétricos em alta resolução, informações ambientais, hidrológicas e climáticas, mapas para temas específicos de uso e ocupação do solo). Esses mapas podem ser atualizados por processos automatizados ("*modelbuilder*" do ArcGIS). No aspecto da acurácia das informações, os mesmos processos podem ser aplicados para geração de bases de dados com maior resolução e elevação das escalas dos mapas.

O armazenamento de bases de dados do Governo Federal com atualização descentralizada e a organização de uma infraestrutura de dados e metadados é uma proposta do programa da Infraestrutura de Dados Espaciais do Ministério do Planejamento - INDE. Entre as informações possíveis de comporem essa base de dados para o setor hidroelétrico, estão alguns mapas matriciais georreferenciados com abrangência nacional propostos nesse estudo: o mapa de favorabilidade ao potencial hidroelétrico, mapa de área de contribuição da drenagem a montante, mapas de comprimento de fluxo a montante e a jusante, mapa de amplitude de declividade por trecho de otobacias, mapa de declividade média por trecho de otobacias, mapa de vazão específica, mapa de vazão média de longo período e mapa de índice topográfico para potenciais hidroelétricos. Outros mapas são possíveis de complementarem as informações: mapa atualizado de transporte de sedimentos, mapa do HAND com resolução de 90 metros, mapa hidrogeológico dentre outros. Alguns desses mapas estão disponíveis, outros podem ser atualizados e elaborados conforme novas informações primárias atualizadas ou novas metodologias. Essas bases de dados de interesse setorial podem ser validadas pelo poder público e devem cumprir as legislações vigentes de acessibilidade da informação à sociedade.

O segundo benefício direto é a possibilidade dos especialistas, academias, servidores públicos, grupos de interesse e a sociedade civil organizada poderem aprofundar informações sobre os potenciais avaliados. Somente o conhecimento sobre o tema, sem informações suficientes sobre os potenciais em questão, não seria suficiente para melhores análises. Essas informações acessíveis podem ser utilizadas sem custo e indistintamente, para finalidades multidisciplinares e estudos transversais aos estudos hidroelétricos.

As informações estruturadas em um ambiente SIG podem ser utilizadas pelos gestores para comunicação mais eficaz de informações relevantes durante as diversas fases dos projetos hidroelétricos. Conforme boas práticas em gestão de projetos, uma das funções da maior importância dos gestores de projetos é promover a adequada comunicação das informações do projeto. As bases de dados em ambiente SIG fornecem meios dos gestores extraírem informações relevantes aos "*stakeholders*" do projeto. A medida que as informações do projeto são melhor conhecidas, é possível a complementar melhores informações às bases de dados do projeto. As informações

estruturadas em sistemas de informações possibilitam uma verificação mais eficaz do que foi planejado e do que está sendo realizado durante as fases posteriores de inventário, projeto básico e projeto executivo.

Como benefício aos tomadores de decisão na fase de estimativa, as informações dos potenciais hidroelétricos, estruturadas em ambiente SIG, possibilitam integrações com outras informações para análises nos sistemas de suporte a decisão. Nesse ambiente são apresentadas informações qualitativas, quantitativas ou mistas para serem observadas de forma realística, para ponderações e priorizações das alternativas. As informações disponibilizadas para consultas interativas, por meio de mapas e metadados, contribuem para minimizar o objetivo da redução da assimetria de informação em relações principal-agente (SECCHI, 2011). Essas relações relevantes em gestão de políticas, programas e projetos governamentais são observadas quando há necessidade do principal delegar funções gerenciais aos agentes, porém, com regras bem definidas para o principal manter conhecimento sobre o ciclo de vida do projeto. Os sistemas de informações são instrumentos para o principal avaliar durante os grupos de processos, as entregas do escopo do projeto e dos produtos, e inclusive, informações de alto nível gerencial sobre a gestão do escopo, do tempo, do custo, da qualidade e dos riscos gerenciados pelos agentes.

Como os projetos hidroelétricos normalmente estão no campo dos projetos de interesse social (acima de 1 MW - PCH e UHE), torna-se também relevante o conhecimento do projeto de potenciais hidroelétricos, desde as fases iniciais, por grupos da sociedade e por todas as partes interessadas. Recomendações sobre o gerenciamento de projetos são apresentadas na 5ª Edição do Corpo de Conhecimento em Gerenciamento de Projetos, PMBoK (2000) do PMI (2013) e ISO21500 (2012). Esse tema pode ser discutido em abordagens sobre gestão por processos para os entes públicos que atuam na gestão de aproveitamentos hidroelétricos.

No capítulo seguinte é discutido o quarto benefício das análises e consultas em ambiente SIG. São abordadas as questões relacionadas à integração dos dados em sistemas de suporte a decisão.

3.9 PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DOS DADOS PARA SUPORTE À DECISÃO

3.9.1 Análise Multicritério AHP

A análise multicritério denominada AHP foi o modelo adotado para integração das informações na metodologia para análise de suporte à decisão. A AHP é um dos principais modelos matemáticos correntemente disponível na teoria de suporte à decisão (VARGAS, 2010) e o mais popular entre as técnicas de tomada de decisão multicritério (POHEKAR e RAMACHANDRAN, 2004). Esses autores ainda afirmam que os métodos multicritério são facilitadores das negociações, quantificação e comunicação das prioridades do projeto. Tradicionalmente, o critério de decisão em análises de projetos de hidroelétricas tem majoritariamente foco nas análises técnicas e econômicas na produção de eletricidade (ALMEIDA *et al.*, 2005).

Os procedimentos metodológicos aplicados nesse estudo enfatizam a avaliação integrada com o máximo de informações qualificadas, a baixo custo, ainda na etapa de prospecção. Foram considerados critérios técnicos, econômico-financeiros, ambiental e social, inclusive o envolvimento dos intervenientes do projeto (“*stakeholders*”). As considerações podem ser alteradas conforme informações são apresentadas. Informações relevantes das alternativas devem ser quantificadas por meio de indicadores (atributos não espaciais) ou extraídos dos mapas e atributos. Os cenários dos potenciais hidroelétricos são elaborados por especialistas com conhecimentos multidisciplinares em engenharia de barragens e hidroelétricas.

No mundo real, as opções por escolha de potenciais hidroelétricos são diversas e existem várias soluções factíveis. Quando os potenciais são estudados sem visita a campo essa questão se torna mais complexa. Em muitos casos o projetista ou especialista não possui a representação do mundo real com a devida acurácia e não aplica as abstrações necessárias ao estudo. Os métodos de otimização, que utilizam pesquisa operacional, não parecem ser os mais apropriados, pois dificilmente expressam nas funções-objetivo os fatores socioculturais e ambientais relevantes a algumas partes interessadas. As análises benefício-custo não costumam internalizar custos sociais e ambientais, e necessitam de abordagens mais sistêmicas de representação do mundo real. Nesses dois métodos as regras de decisão são definidas a priori. O método AHP possibilita que as regras de decisões sejam definidas por ponderações dos critérios entre os “*stakeholders*” e análises de sensibilidade, concomitantes ao processo decisório.

3.9.2 Integração dos dados na análise multicritério

A proposta da integração de dados no ambiente multicritério consiste em reunir as melhores informações espaciais e não espaciais, de forma a reduzir o vazio de informações existente entre as fases de estimativa e inventário hidroelétrico. São extraídas informações espaciais e atributos do ambiente SIG e adicionadas informações não espaciais dos potenciais hidroelétricos obtidas por indicadores e pesquisas com a sociedade.

3.9.3. Sequência Metodológica da aplicação do método AHP

Na modelagem da avaliação multicritério AHP foram seguidas as seguintes etapas: modelagem do problema, definição dos pesos, agregação dos pesos e análise de sensibilidade (HELFERT, 1997).

São realizadas a seleção e priorização de critérios e subcritérios e estabelecidas alternativas a partir dos objetivos. Os pesos entre os critérios e subcritérios são definidos de forma par a par, “*pairwise comparisons*” (KAINULAINEN *et al.*, 2009). A matriz de dados das alternativas é preenchida para julgamento e cálculo. O processo iterativo do julgamento tanto qualitativo como quantitativo foi realizado em uma escala de preferência de nove níveis (SAATY, 2005) e avaliado pela taxa de consistência (CR). Os resultados da agregação dos valores são depois avaliados por análise de sensibilidade, considerando a variação dos pesos dos critérios ou a variação dos dados de entrada da matriz.

3.9.4 Seleção e priorização de critérios

Conforme citado em Vargas (2010), um dos maiores desafios nas organizações na atualidade reside na habilidade de escolher a mais correta e consistente alternativa na qual o alinhamento da estratégia seja mantido. Dada uma específica situação, tomar a decisão correta é provavelmente um dos mais difíceis desafios para a ciência e tecnologia (TRANTAPHYLLOU, 2002).

Nesse estudo entende-se como estratégia a escolha do potencial com geração da maior energia, com menor custo e menores impactos socioambientais. Esse objetivo estratégico embasa a seleção dos critérios, considerando as limitações para aquisição de dados e informações.

Na seleção dos critérios foram consideradas prioridades e restrições para todos os fatores. A escolha dos pesos poderá variar entre avaliações de outros conjuntos de projetos conforme necessidade de alinhamento dos objetivos com as preferências dos tomadores de decisão. No entanto, os critérios devem refletir as diferentes dimensões a serem estudadas dentro das limitações de alcance de melhores informações.

3.9.5 Critérios propostos na priorização de projetos hidroelétricos

Para a fase de prospecção foram propostos critérios que se relacionam às potencialidades e restrições com meta de priorizar a melhor composição das alternativas de potenciais hidroelétricos para geração da maior energia, com menor custo e menores impactos socioambientais.

Na modelagem do problema e na definição dos objetivos e critérios, foram definidos quatro grupos de fatores chave: técnicos, econômico-financeiros, sociais e ambientais, para representar potencialidades e restrições na priorização de projetos na fase de prospecção. Os grupos são desagregados para alcançar indicadores quantitativos ou qualitativos.

Algumas informações na forma de dados e indicadores podem ser obtidas dos mapas temáticos gerados, outras são geradas por metodologias paramétricas (PMBok, 2000; BARCELLOS *et al.*, 2003), por métodos “top-down” (ou por analogias) ou por estimativa composição de custos (métodos bottom-up) para quantificação de projetos quando as informações representativas são factíveis de ser obtidas. Alguns indicadores podem ser obtidos por consultas a especialistas, registros existentes e pesquisas entre os interessados. Por não serem necessárias entradas de dados em valores absolutos, podem ser usados indicadores normalizados ou em classes.

A Figura 3.36 apresenta os critérios e sub-critérios para priorização de potenciais em estágio de prospecção. Os itens em vermelho são sub-critérios que não possuem dados ou indicadores das alternativas apresentadas, enquanto os itens em cinza possuem informações (dados ou indicadores) sobre as alternativas em questão. As cores em vermelho representam critérios com dados não preenchidos na matriz de alternativas enquanto cinza representa os critérios com dados preenchidos.

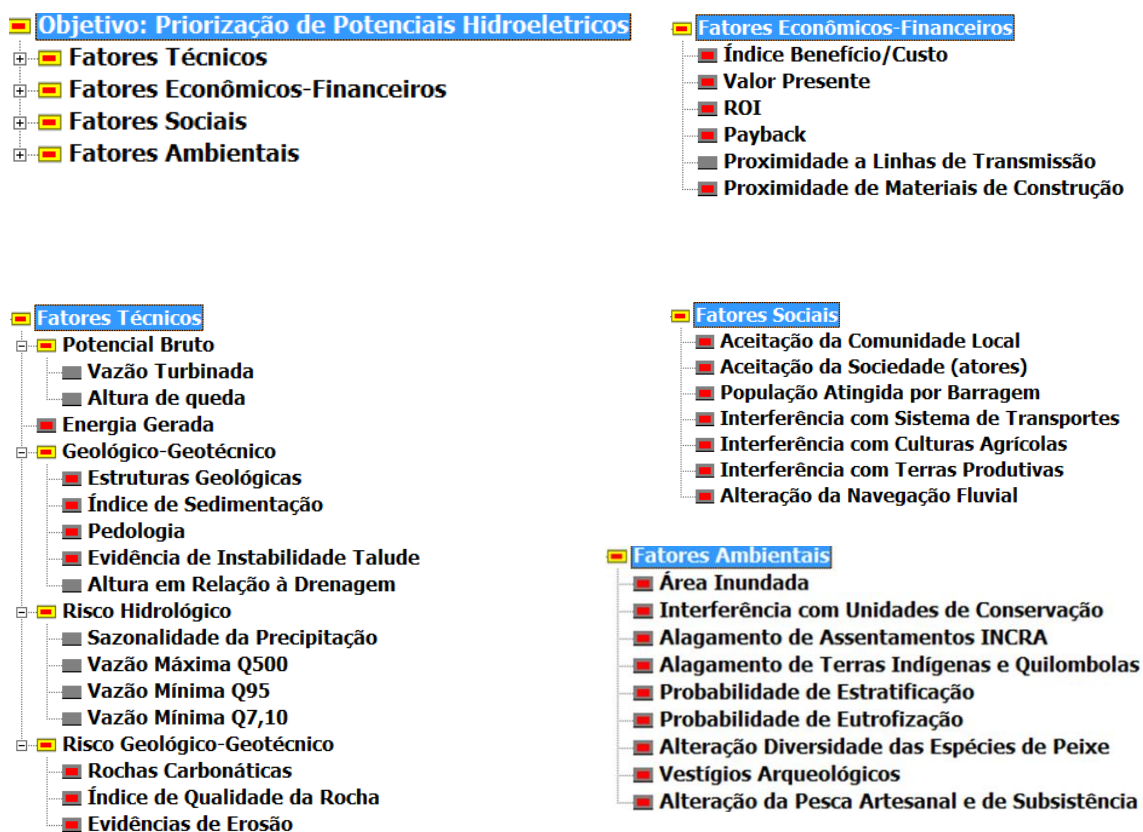


Figura 3.36. Critérios e sub-critérios usados no estudo e dados aplicados às alternativas.

3.9.6 Ponderação dos critérios e subcritérios e descrição

Os pesos dos critérios e subcritérios são determinados de forma pareada, desde o nível mais baixo do subcritério, para composição de todos os pesos pelo método AHP. Entre os diversos meios de comparação entre critérios apresentados em Triantaphyllou e Mann (1995), foi adotada a escala Saaty (SAATY, 2005) conforme Tabela 3.8:

Tabela 3.8: Escala Saaty de importância relativa.

| Escala | Termo Utilizado (Saaty, 2005) | Taxa Numérica | Recíproco |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------|
| Extremamente Preferido | Extremely preferred | 9 | 1/9 |
| Muito forte para extremamente | Very strong to extremely | 8 | 1/8 |
| Muito forte preferido | Very strong preferred | 7 | 1/7 |
| Fortemente para muito fortemente | Strongly to very strongly | 6 | 1/6 |
| Fortemente preferido | Strongly preferred | 5 | 1/5 |
| Moderadamente para fortemente | Moderately to strongly | 4 | 1/4 |
| Moderadamente preferido | Moderately preferred | 3 | 1/3 |
| Igualmente para moderadamente | Equally to moderately | 2 | 1/2 |
| Igualmente preferido | Equally preferred | 1 | 1 |

Fonte: Adaptado de Saaty (2005).

A etapa de atribuição dos pesos é crítica para o alcance dos objetivos da avaliação multicritério. O Índice de Consistência (CI) dos pesos atribuídos aos critérios e objetivos é realizada no aplicativo ExpertChoice (ISHIZAKA e LABIB, 2009) conforme a equação:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Onde λ_{max} é o autovalor e n é a dimensão da matriz. A Taxa de Consistência (CR) é a relação entre CI e RI ($CR = \frac{CI}{RI}$), onde RI é um Índice Randômico do CI médio de 500 matrizes randomicamente preenchidas. Conforme Ishizaka e Labib (2009) essa taxa de consistência tem sido criticada por alguns autores (KWIESIELEWICZ e VAN UDEN, 2004; BANA E COSTA e VANSNICK, 2008) e outras técnicas têm sido propostas no sentido de descobrir julgamentos contraditórios e corrigi-los (ISHIZAKA e LUSTI, 2004; WANG et al, 2009).

No aplicativo ExpertChoice se o valor de CR for menor que 10% (relação entre CI e RI menor dez por cento), então a matriz é considerada de consistência aceitável. (ISHIZAKA e LABIB, 2009).

O tipo de avaliação da informação/indicador relacionada ao critério adotado na Tabela 3.9 refere-se à forma proposta de aquisição do dado no estágio de prospecção. Foram consultados pesos de outros trabalhos em potenciais hidroelétricos. Não houve aplicação de consultas padronizadas conforme práticas Delphi (TUROFF, 2002). Essas ponderações podem variar conforme o nível de conhecimento sobre os critérios estudados. Nessa pesquisa os pesos par a par foram baseados de pesquisas anteriores ou definidos por reunião entre especialistas. Em etapas posteriores os dados poderão ser obtidos por processos determinísticos ou poderão ser mais bem quantificados. O símbolo “G” representa a possibilidade de o dado ser obtido de mapas georreferenciados em ambientes Sistemas de Informações Geográficas.

Tabela 3.9: Critérios AHP para priorização de potenciais em estágio de prospecção.

| CRITÉRIOS E SUB-CRITÉRIOS | COD | TIPO | PESO |
|--|-----------|---------------------------|--------------|
| 1. Fatores Técnicos | A | | 0,415 |
| 1.1 Potencial Bruto | AA | | 0,425 |
| 1.1.1 Vazão Qmlp (ou Vazão Turbinada) | AA1 | Quantitativo ^G | 0,500 |
| 1.1.2 Amplitude de altimetria em trechos (Altura de Queda) | AA2 | Quantitativo ^G | 0,500 |
| 1.2 Energia Gerada Estimada | AB | | 0,284 |
| 1.2 Geológico-geotécnico | AC | | 0,056 |
| 1.2.1 Estruturas Geológicas | AC1 | Qualitativo ^G | 0,264 |
| 1.2.2 Índice de Sedimentação | AC2 | Quantitativo ^G | 0,083 |
| 1.2.3 Pedologia / Hidrogeologia | AC3 | Qualitativo ^G | 0,083 |
| 1.2.4 Evidência de Instabilidade de Talude | AC4 | Qualitativo ^G | 0,083 |
| 1.2.5 Altura em Relação à Drenagem | AC5 | Qualitativo ^G | 0,485 |
| 1.3 Riscos Geológico-Geotécnicos | AD | | 0,149 |
| 1.2.6.1 Rochas Carbonáticas | AD1 | Qualitativo ^G | 0,667 |
| 1.2.6.2 Índice de Qualidade da Rocha | AD2 | Quantitativo ^G | 0,167 |
| 1.2.6.3 Evidências de Erosão | AD3 | Qualitativo ^G | 0,167 |

| | | | |
|--|-----------|---------------------------|--------------|
| 1.4 Riscos Hidrológicos | AE | | 0,086 |
| 1.3.1 Sazonalidade da Precipitação | AE1 | Quantitativo ^G | 0,455 |
| 1.3.2 Vazão Máxima Q500 | AE2 | Quantitativo ^G | 0,263 |
| 1.3.3 Vazão Mínima Q95 | AE3 | Quantitativo ^G | 0,141 |
| 1.3.4 Vazão Mínima Q7,10 | AE4 | Quantitativo ^G | 0,141 |
| 2. Fatores Econômico-Financeiros | B | | 0,098 |
| 2.1 Índice Benefício/Custo | B1 | Quantitativo | 0,118 |
| 2.2 Valor Presente Líquido | B2 | Quantitativo | 0,079 |
| 2.3 ROI | B3 | Quantitativo | 0,079 |
| 2.4 Payback | B4 | Quantitativo | 0,261 |
| 2.5 Proximidade a Linhas de Transmissão | B5 | Quantitativo ^G | 0,300 |
| 2.6 Proximidade a Materiais de Construção | B6 | Quantitativo ^G | 0,163 |
| 3. Fatores Sociais | C | | 0,244 |
| 3.1 Aceitação da Comunidade Local | C1 | Qualitativo | 0,231 |
| 3.2 Aceitação da Sociedade (atores) | C2 | Qualitativo | 0,264 |
| 3.3 População Atingida por Barragem | C3 | Quantitativo ^G | 0,094 |
| 3.4 Interferência com Sistemas de Transporte | C4 | Quantitativo ^G | 0,083 |
| 3.5 Interferência com Culturas Agrícolas | C5 | Quantitativo ^G | 0,131 |
| 3.6 Interferência com Terras Produtivas | C6 | Quantitativo ^G | 0,131 |
| 3.7 Alteração da Navegação Fluvial | C7 | Qualitativo | 0,067 |
| 4. Fatores Ambientais | D | | 0,244 |
| 4.1 Área Inundação máxima do reservatório | D1 | Quantitativo ^G | 0,084 |
| 4.2 Interferência com Unidades de Conservação | D2 | Quantitativo ^G | 0,293 |
| 4.3 Alagamento de Assentamentos do INCRA | D3 | Quantitativo ^G | 0,064 |
| 4.4 Alagamento de Terras Indígenas e Quilombolas | D4 | Quantitativo ^G | 0,103 |
| 4.5 Probabilidade de Estratificação | D5 | Qualitativo | 0,038 |
| 4.6 Probabilidade de Eutrofização | D6 | Qualitativo | 0,038 |
| 4.7 Alteração Diversidade das Espécies de Peixe | D7 | Qualitativo | 0,121 |
| 4.8 Vestígios Arqueológicos | D8 | Qualitativo | 0,180 |
| 4.9 Alteração da Pesca Artesanal e de Subsistência | D9 | Qualitativo | 0,079 |

OBS.: ^G Possibilidade de utilização de variáveis em SIG para organização e extração da informação para aplicação na AHP.

Propostas de atribuição de pesos adotados em análise multicritério em casos para priorização de potenciais hidroelétricos podem ser encontrados em Supriyasilp *et al.* (2009) e Supriyasilp *et al.* (2007), entre outros. Vargas (2010) apresentou estudos de priorização de gerenciamento de projetos detalhando pesos de critérios estratégicos em gerenciamento de projetos, critérios econômico-financeiros e critérios aceitação/comprometimento dos “*stakeholders*”. Verifica-se entre os autores a variabilidade sobre os pesos dos critérios conforme o entendimento sobre o problema estudado.

3.9.6.1 Potencialidades e restrições dos Fatores Técnicos

Os fatores técnicos representam os fatores da engenharia em aspectos físicos e eventos naturais que influenciam na geração de hidro energia, sob o enfoque dos estudos energéticos e da composição dos arranjos, seja para uma alternativa de divisão de quedas ou para o estudo de um potencial isolado. Esses fatores são desagregados em potencial bruto estimado, características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas que impactam no posicionamento do eixo do barramento e no armazenamento de água do reservatório.

O potencial bruto de energia hidroelétrica é composto da estimativa da avaliação hidrológica e do estudo geomorfológico para estimativa de quedas d'água. O mapa de favorabilidade ao potencial bruto foi proposto por meio da regionalização da vazão média de longo período e pelo mapa do Índice Topográfico em trechos de rios, obtido do MDE do SRTM para grade de altimetria de 90 x 90 metros. Esse mapa fornece a informação normalizada do produto da vazão hidrológica pela queda topográfica, na ausência de informações mais acuradas da estimativa da vazão turbinada e da queda líquida. A medida de altimetria pode ser estimada por topografia ou sensoriamento remoto em MDE/MDT de maior resolução. Para potenciais hidroelétricos com reservatórios, Larentis (2009) estimou, em primeira mão, a Vazão Máxima Regularizável (VMR), baseada em dados de literatura, como uma fração da Vazão Média de Longo Período (Q_{mlp}), em torno de 75%. Outros parâmetros de estimativa de vazão para estudos de potência bruta, proposto por Faria (2011) são a vazão específica da média de longo período (q_{mlt}) e a vazão específica para permanência de 50% ($q_{50\%}$) medidos em litro por segundo por quilômetro quadrado ($l/s/km^2$). Faria (2011) utilizou para estudos de potência média a utilização da variável vazão média de longo período (ou vazão média de longo termo), conforme a equação:

$$P_{mlt} = 9,81 * \eta * (Q_{mlt} - Q_{eco}) * H_{liq}$$

Para estudos de potência média correspondente à energia gerada, FARIA (2011) utilizou a variável vazão correspondente a 50% da curva de permanência, conforme a equação:

$$P_{50\%} = 9,81 * \eta * (Q_{50\%} - Q_{eco}) * H_{liq},$$

onde:

P_{mlt} = Potência média correspondente à energia gerada com a vazão média de longo período (MW médios);

$P_{50\%}$ = Potência média correspondente à energia gerada com a vazão correspondente a 50% da curva de permanência (MW médios);

Q_{mlt} = Vazão média de longo termo;

$Q_{50\%}$ = Vazão correspondente a 50% da curva de permanência;

Q_{eco} = Vazão ecológica (m^3/s);

H_{liq} = Queda Líquida (m);

η = Eficiência do conjunto turbina e gerador

A queda líquida (H_{liq}) será igual à queda bruta menos as perdas hidráulicas, previamente estima-se uma redução de 3% da queda bruta para casa de força ao pé da barragem e de 5% para arranjos em derivação.

Segundo Garcia e Andrezza (2004), a “vazão ecológica é aquela que possibilite ao ambiente hídrico manter a integridade dos processos naturais que se dão entre o meio

físico e a biota, valorizando especialmente as inter-relações vinculadas às variações do regime hidrológico natural”. A definição da vazão ecológica deve ser feita com base na legislação vigente de cada estado. Na bacia do rio Doce a vazão ecológica remanescente correspondente a 70% da vazão $Q_{7,10}$ de acordo com a legislação estadual mineira vigente (IGAM,1998).

A estimativa da energia gerada no estágio de prospecção é de difícil precisão em virtude de incertezas nos aspectos do regime hidrológico, das características dos arranjos energéticos, entre eles o tipo definido da usina (características das usinas por reservatório ou a fio d’água), o conjunto turbina-gerador, a quantidade de unidades geradoras ou as horas estimadas de geração. No entanto, pode-se estimar preliminarmente, uma relação entre Potência (KW) x Energia (KWh) por meio do Fator de Capacidade adotado para a usina estudada (ELETROBRÁS, 2000).

Os riscos hidrológicos podem representar graves problemas à geração anual de energia, indicar complexidades durante a construção da obra (ex. galgamento de ensecadeiras durante a obra de desvio do rio) ou riscos de galgamento da barragem durante a operação por causas hidrológicas. As informações de vazões extremas podem ser obtidas dos mapas das regionalizações da vazão máxima de tempo de retorno de quinhentos anos ($Q_{\max 500}$) e das vazões mínimas de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e a vazão mínima associada a 95% de permanência no tempo (Q_{95}). Métodos hidrológicos para estimativa de vazões extremas foram recomendados nas “Diretrizes para estudo e projetos em Pequenas Centrais Hidroelétricas” em Eletrobrás (2000), porém, a apresentação das informações em forma de mapas possibilita extração de informações derivadas para finalidades além do campo de conhecimento da hidrologia. Essas vazões extremas podem ser apresentadas em mapas matriciais de forma a orientar o tomador de decisão sobre as quantificações de vazões em períodos de cheias intensas ou em períodos de estiagem nos sítios dos potenciais avaliados.

O mapa de sazonalidade da precipitação média anual de séries históricas superiores há 25 anos possibilita a quantificação do desvio padrão da precipitação entre os períodos chuvosos e secos. Quando a sazonalidade (desvio padrão) é estudada em conjunto com valores de precipitação médias e extremas, pode-se verificar evidências regimes hidrológicos causadores de cheias ou estiagens. Tais eventos são relevantes para estimativas preliminar de componentes de reservatórios.

As características geológico-geotécnicas complementadas pelas informações geomorfológicas aprofundam o estudo dos arranjos do aproveitamento hidroelétrico. Mapas geomorfológicos podem indicar declividades elevadas a distâncias próximas ao rio, indicando favorabilidade ao posicionamento de eixos de barramento. Além disso, informações geomorfológicas possibilitam estimar previamente um tipo de barragem, o posicionamento das ombreiras, a localização da casa de força e da tomada de água. Os estudos da hidrologia das águas subterrâneas e das águas superficiais estão diretamente relacionados, pois, geralmente formam um sistema conectado. O escoamento pode ser em qualquer direção e a taxa de escoamento varia geograficamente e sazonalmente. A troca não é relevante em alguns aquíferos. No

entanto, as águas subterrâneas fornecem um volume estimado em 30% de escoamento total nos cursos d'água superficiais e a infiltração dos cursos d'água é uma fonte de escoamento principal para alguns aquíferos (SOLIMAN, 2010). Os estudos hidrogeológicos são relevantes em engenharia hidrológica das regiões áridas e semiáridas no Brasil. As quantificações mais adequadas de escoamento (superficial, subsuperficial e águas subterrâneas), interceptação, transpiração e evaporação devem ser observadas no sistema hidrológico da bacia hidrográfica em estudo.

Entre os estudos geomorfológicos o mapa de HAND possibilita a observação das alturas em relação à drenagem mais próxima (RENNÓ *et al.*, 2008). Esse mapa facilita a verificação de áreas favoráveis ao posicionamento do eixo da barragem em casos de resoluções adequadas do MDE/MDT para se identificar distâncias e elevações ao eixo de rios, capazes de estimar um eixo de barramento. Conforme a resolução do HAND é possível uma estimativa prévia da altura máxima da barragem do reservatório em relação à cota do espelho d'água do rio.

De posse do cenário proposto para o arranjo é possível identificação "in loco" de indicadores do estado de tensão dos maciços rochosos e das informações prévias para caracterização e classificação de solos e rochas. Segundo Costa (2012), na etapa de investigação geológico-geotécnica, em controle de campo devem ser verificadas estruturas geológicas, rochas mapeadas e no que se refere à pedologia, a caracterização dos solos de cobertura (alúvio, elúvio e colúvio). Um índice para designar a qualidade da rocha é denominado RQD (DEERE *et al.*, 1967; DEERE E DEERE, 1988). Ele é um indicador importante para as zonas de rochas de baixa qualidade. Atualmente, o RQD é usado como um parâmetro padrão na exploração de núcleo de perfuração, e forma um valor de elemento básico dos principais sistemas de classificação de massas: Sistema de classificação de massa da rocha (Rock Mass Rating - RMR) e sistema Q (BARTON *et al.*, 1974), descritos como as principais classificações geomecânicas (BIENIAWSKI, 1989).

O Índice de Sedimentação relaciona-se a um indicador do tempo de vida útil do reservatório, medindo-se pela relação entre o período de retenção e a velocidade média no reservatório (STRAND, 1974; VANONI, 1977; ELETROBRÁS, 2000; CAMPAGNOLI, 2006). Para fins de estudos preliminares esse índice pode ser extraído de mapas de produção de sedimentos em tonelada/Km²/ano (SIGEL) ou por medições de percentual de silte passando por uma seção (VANONI, 1977; ELETROBRÁS, 2000). Estudos sobre os efeitos do assoreamento em reservatórios hidroelétricos e geoindicadores foram realizados por Almeida e Carvalho (1993) e CAMPAGNOLI (2002). O mapa da Figura 3.37 (COELHO, 2007b) georreferencia a produção de sedimentos na bacia do rio Doce, calculado por meio de análises espaciais de dados de geologia/geomorfologia, solo, hipsometria, uso do solo e pluviosidade.

Os modelos de previsão da vida útil dos reservatórios, baseados em taxas de retenção ou avanços de assoreamento do rio principal em direção ao barramento, devem ser revistos para considerar as contribuições de sedimentos de rios tributários aos reservatórios, sempre desconsiderados nos projetos de usinas hidroelétricas (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012). Modelos computacionais de previsão de erosão e

dados sedimentométricos do sedimento transportado e dos depósitos, verificados no interior do reservatório de Três Marias no Alto Rio São Francisco (MG), indicaram o aporte de sedimentos do tributário Rio Indaiá superior ao Rio São Francisco (MACEDO, 2009). Modelos que consideram apenas o transporte de sedimentos pelo rio principal não detectariam a influência que a bacia do Indaiá tem no assoreamento do reservatório de Três Marias. Os avanços na aplicação de modelos robustos para estudos de erosão, transporte e deposição de sedimentos podem contribuir com geoindicadores nas fases preliminares e posteriormente no monitoramento de reservatórios de hidroelétricas durante o ciclo de vida.

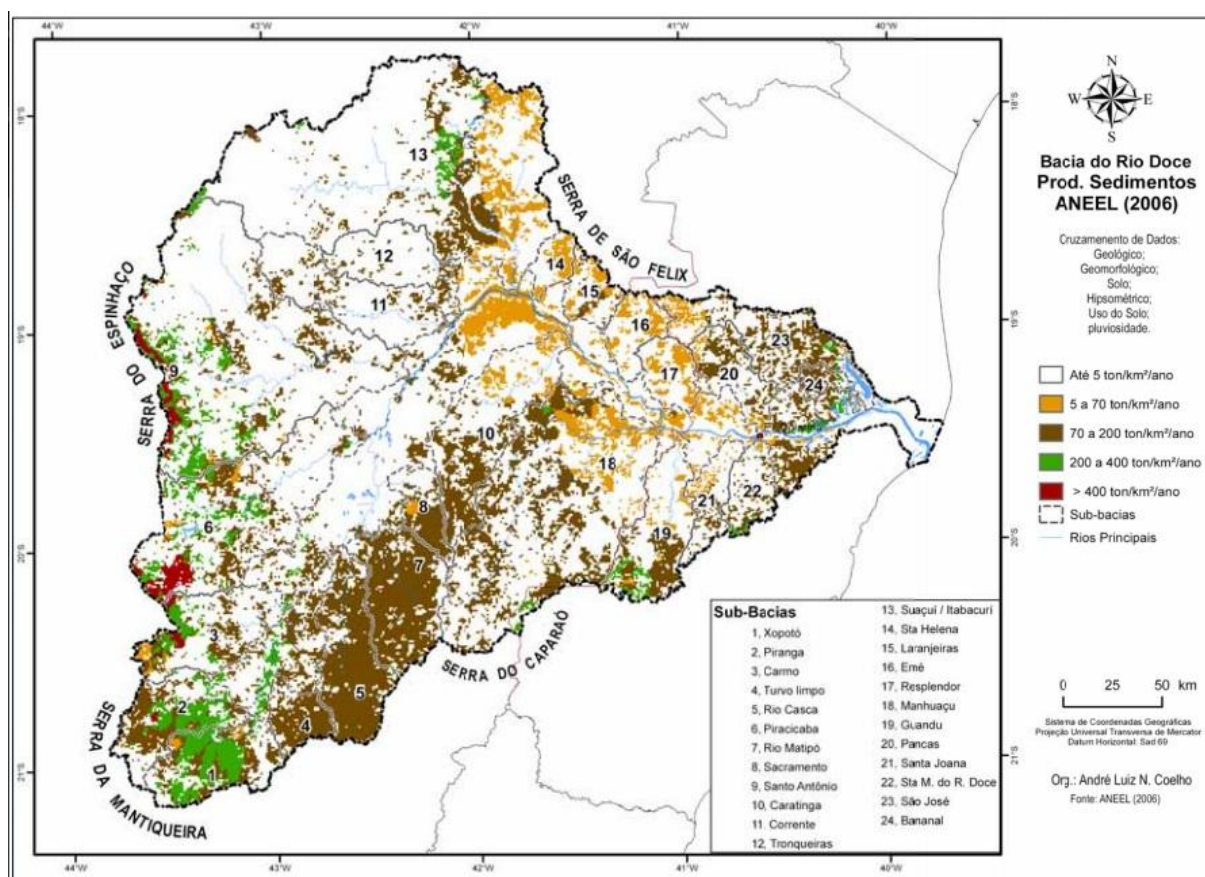


Figura 3.37. Mapa de produção de sedimentos na bacia do rio Doce. Fonte: COELHO (2006).

Nessa etapa de prospecção podem ser verificadas por especialistas as ameaças inerentes ao cenário proposto devido o conhecimento prévio da posição e tipo da barragem e da área de abrangência do reservatório. Os riscos (probabilidade x impactos) detectados pelas investigações geológico-geotécnicas devem ser verificados quanto à presença de rochas carbonáticas, evidências de salinização, evidências de instabilidades de taludes e erosão. Caso não existam essas informações, as informações de ameaças podem ser obtidas por estudo de campo e apresentadas por meio de mapas temáticos.

3.9.6.2 Potencialidades e restrições dos Fatores Econômicos e Financeiros

Os fatores econômico-financeiros são grupos de critérios com objetivo de capturar os benefícios econômicos ou financeiros do projeto relacionados com custos ou desempenho. São eles:

Índice de Custo-Benefício: Dentre os métodos tradicionais da Engenharia Econômica para priorização de projetos de investimento, destaca-se o método da Razão Incremental Custo/Benefício, também conhecido como método do Índice de Custo Benefício (ICB). Uma vez calculados os valores dos índices ICB para cada projeto, o critério de decisão consiste em se investir nos projetos por ordem de mérito decrescente, ou seja, do menor para o maior valor de ICB. Em um sistema de geração predominantemente hidroelétrico, o benefício energético (parcela do numerador na análise multicritério) da operação integrada de um empreendimento de geração, hidroelétrica ou termelétrica, pode ser avaliado pela garantia física da usina em MW médio. Esse benefício é função do nível de inflexibilidade no despacho da usina e do custo variável unitário. O custo (parcela do denominador na análise multicritério) seria a soma dos custos esperados fixos, de operação e custo econômico de curto prazo em R\$/ano. Assim, o Índice de Custo Benefício (R\$/MWh) de cada empreendimento de geração, doravante denominado ICB, é definido como a razão entre o seu custo total e o seu benefício energético⁶¹. O índice Custo-Benefício Energético foi proposto em Eletrobrás/CEPEL (2007) para ser aplicado ao estágio de inventário.

Valor Presente Líquido: O Valor Presente Líquido (VPL), também conhecido como valor atual líquido (VAL) ou método do valor atual, é a fórmula matemático-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial⁶². Devido a progressividade dos projetos, em etapas iniciais com escassas informações quantitativas do projeto, os custos podem ser estimados por métodos paramétricos (PMBok, 2000).

Retorno do Investimento (Return On Investment - ROI) é uma medida de desempenho, usada para avaliar a eficiência do investimento ou para comparar a eficiência de um número de investimentos dividido pelo custo do investimento, expresso em percentual ou taxa⁶³. O “payback” é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento.

Segundo Eletrobrás (2000), é recomendado existir no local, de preferência, ou na região, jazidas naturais de materiais de construção em quantidade e com qualidade adequada, que minimizem as distâncias de transporte até o local das obras. Esse indicador da proximidade de materiais de construção para empréstimos pode ser avaliado por consultas aos especialistas em visitas “in loco” com as devidas informações de sondagens geotécnicas. A apresentação das jazidas de empréstimo pode ser apresentada por meio de mapas temáticos georreferenciados.

⁶¹ Extraído do documento da metodologia de cálculo do Índice de Custo Benefício (ICB) de Empreendimentos de Geração Termelétrica de No EPE-DEE-RE-102/2008-r3, extraído de http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/ANEXO%20XIV%20-%20Metodologia%20do%20C%3%A1lcuro%20do%20%20C%3%8Dndice%20de%20Custo%20Benef%3%ADcio%20-%20ICB.pdf, acessado em 24/9/2013.

⁶² Extraído de Wikipedia, http://pt.wikipedia.org/wiki/Valor_presente_l%C3%ADquido, acessado em 24/9/2013.

⁶³ <http://www.investopedia.com/terms/r/returnoninvestment.asp>.

Eletrobrás/CEPEL (2007) propõe em manuais e planilhas indicadores paramétricos para estimativa de alguns custos diretos e indiretos para pré-dimensionamento e quantificações financeiras. Existem diversos estudos econômico-financeiros sobre indicadores de desempenho baseados em dados chave de hidroelétricas (EURELECTRIC, 2000; LAKO *et al.*, 2003; BØCKMAN *et al.*, 2006) conforme tipos de usinas hidroelétricas (custo de investimento financeiro por energia estimada; tempo de vida, eficiência de turbinas, emissão de CO₂ e outros gases em Kg por energia gerada, entre outros). Métodos estatísticos obtidos de dados de séries históricas no Brasil e no Mundo são úteis para estimativas econômico-financeiras paramétricas na prospecção de potenciais.

Em estágio de prospecção, a indicação da proximidade com linhas de transmissão pode ser obtida por meio de mapas gerados por interpoladores que utilizam distâncias euclidianas ou adicionar a consideração de custos de distância (ESRI, 2002), devido impedimentos naturais ou legais para a construção de “linhões” até alcance de linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional – SIN, conforme apresentado nessa pesquisa. Estudos de conexão seguem faixas de potência de usinas, em uma relação faixa de potência (MW) x tensão (KV). A tensão de transmissão é usualmente definida técnica e economicamente pela tensão de conexão disponibilizada pelo Agente de Distribuição local (MAURO FILHO e ZANIN, 2008).

3.9.6.3 Potencialidades e restrições dos Fatores Sociais

As pesquisas internacionais recomendam a participação social e a internalização dos custos sociais e ambientais para a sustentabilidade do projeto (KLIMPT *et al.*, 2002; KUSHWAHA *et al.*, 1996; WCED, 1987; FREY e LINKE, 2002; DUDHANI *et al.*, 2006; ROJANAMON *et al.*, 2009). Os autores propõem a participação das comunidades no processo e levantamentos da opinião pública. Nessa pesquisa a premissa é que o conhecimento de fatores sociais deva ser previsto o mais antecipadamente possível para não incorrer em custos posteriores à escolha do potencial hidroelétrico a ser explorado. Nas pesquisas os autores propõem reuniões com as comunidades locais para reunir grupos com foco na mitigação dos impactos sociais e críticas ao projeto, fundamentadas no conhecimento do ambiente do sítio estudado. Rojanamon *et al.* (2009) realizaram pesquisa por meio de questionários na qual foram elaborados mapas temáticos de “scores” em SIG conforme critérios socioambientais. Segundo o autor, a clareza da informação e a discussão dos impactos facilita a aceitação da sociedade ainda na fase de estimativa. Alguns pontos sobre a avaliação de impactos socioambientais positivos e negativos são recomendados no Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas (ELETROBRÁS/CEPEL, 2007). Conforme Eletrobrás (2007) a compensação ambiental (Lei nº 9.985/2000) não deve ser considerada como um impacto positivo. Portanto, deve-se distinguir o que seriam as compensações ambientais e as entregas à sociedade.

As diretrizes citadas no manual podem facilitar na elaboração de uma Estrutura Analítica do Projeto – EAP (Work Breakdown Structure - WBS) voltada às entregas do projeto (PMBok, 2000). A forma de apresentação pode ser por meio de mapas ou

informações tabulares. Os processos necessários às avaliações de potenciais hidroelétricos devem estar mapeados em uma grade de estágio de execução e área de conhecimento. Essas seriam as diretrizes operacionais (dados/informações, processos bem definidos) para apoiar o tomador de decisão e permitir que a sociedade (*stakeholders*, quando o interesse é nacional) possa conhecer de forma clara as potencialidades e restrições decorrentes da implantação da usina hidroelétrica (alterações no mercado de trabalho local, benefícios financeiros das compensações aos municípios, infraestrutura construída, uso racional dos recursos hídricos, mudanças culturais do uso e ocupação do solo). As entregas à sociedade local teriam influência direta sobre os fatores econômico-financeiro da alternativa.

Nessa proposta foram definidos na AHP critérios de aceitação da comunidade local e de aceitação dos atores intervenientes no processo, atuando de forma tanto positiva como negativa nos processos de decisão da escolha do projeto. A participação desses atores no processo, denominados “*stakeholders*”, recomendadas nas melhores práticas em gerenciamento de projetos (PMBok, 2000), exercem influências diversas que devem ser conhecidas no momento das considerações econômica e de engenharia do projeto. Os atores dessas políticas setoriais são compostos pelo poder público, agências reguladoras, projetistas e especialistas, academia, grupos de interesse, empresas de negócios, organizações não governamentais, representantes das comunidades locais e regionais e a sociedade civil organizada. O benefício da apresentação dos resultados dos levantamentos nas comunidades locais em forma de mapas temáticos é a possibilidade de associar novos dados aos critérios adotados às avaliações de engenharia e de economia, conforme propõe Rojanamon *et al.* (2009).

Os mapas temáticos têm a capacidade de transmitir informações com mais clareza aos interessados que não possuam conhecimentos especializados em engenharia de reservatórios hidroelétricos e seus impactos. As práticas brasileiras aplicam séries de audiências públicas para os estudos de projetos de hidroelétricas, porém, ainda é necessário aperfeiçoamentos de mecanismos de redução da assimetria de informações entre comunidades locais e regionais e todos os intervenientes no projeto, no que se refere à fase de apresentação da informação e à qualidade adequada da informação naquela fase.

Com a definição da cota de inundação em mapa georreferenciado em SIG, em casos de usinas com reservatórios, é possível traçar o polígono de inundação e estimar previamente áreas urbanizadas atingidas, as interferências com rodovias, ferrovias e áreas aeroportuárias, por meio de relações topológicas em ambiente SIG. O mapa de uso e ocupação do solo permite identificar áreas de culturas agrícolas e áreas produtivas que estariam em conflitos com o polígono de inundação do potencial estudado, de forma a extrair valores a serem considerados no modelo AHP. Um critério factível de consideração de impactos sociais em fase de prospecção em função da construção do barramento é a avaliação da alteração das práticas de navegação, seja no aspecto do transporte, da pesca artesanal ou de subsistência.

3.9.6.4 Potencialidades e restrições dos Fatores Ambientais

A estimativa preliminar de uma cota de inundação para o estudo de um determinado potencial hidroelétrico é um ponto chave aos estudos sociais e ambientais preliminares. Identificada a cota em função da posição geográfica e altura de queda estimada no barramento, o aplicativo SIG possibilita rápida definição do polígono de inundação em função da definição das curvas de nível – MDE ou rede irregular de triângulos – TIN (VERDIN, 1997; MAIDMENT, 2002; ESRI, 2002).

Por meio de análises topológicas de pertinência e conteúdo, é possível uma rápida seleção por locação de todas as unidades de conservação, terras indígenas, quilombolas e áreas de assentamento de comunidades do Programa Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA. A quantificação das áreas de conflitos para cada tema pode ser informada ao modelo AHP e apresentadas em forma de mapas temáticos para fortalecer a informação de cunho dos impactos sociais, contribuindo para redução de assimetrias de informação.

As observações da probabilidade de estratificação e da eutrofização (CARLSON, 1977; TOLEDO, 1983) podem ser verificadas de forma prévia em função das evidências da ocupação do solo e das condições estimadas do reservatório, em função do polígono georreferenciado da área de inundação estimada, da geomorfologia e do regime hidrológico. A estratificação ocorre quando a zona superior do reservatório é termicamente dividida da zona mais profunda, podendo causar estagnação e ausência de oxigênio dissolvido (ambiente anaeróbico), tornando-se indisponível à vida aquática. As variáveis para rápida medição da estratificação são comprimento do reservatório, média de profundidade do reservatório (pode ser relacionado à altura da barragem), afluxo médio de água e volume do reservatório (ELETROBRÁS, 2000). O indicador do nível de estratificação é denominado número densimétrico de Froude (Densimetric Froude Number – F), conforme descrito em Ledec e Quintero (2003). Se F é menor que 1, alguma estratificação é esperada, e a severidade ocorre quanto menor é o valor de F. Quando F é maior que 1 a estratificação não é esperada. Essas medidas podem ser obtidas por dados preliminares para estimativas em ambiente SIG.

A eutrofização é um aspecto da produtividade dos lagos e deve ser analisada da mesma forma em ambientes naturais e em reservatórios (OCDE, 1982; XAVIER, 2005). A probabilidade de eutrofização pode ser identificada pelo Índice do Estado Trófico (IET). São cinco categorias do estado trófico: ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico, hipereutrófico (CETESB, 2011). O Índice do Estado Trófico tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. As variáveis são relacionadas à presença de clorofila (IET – CL) e ao fósforo total (IET – PT). Pela análise comparativa dos resultados obtidos nas duas sub-bacias, Xavier (2005) concluiu que os usos do solo são extremamente importantes em definir a qualidade dos corpos d'água, porém, no que diz respeito aos reservatórios estudados pelo autor, as características morfológicas, principalmente a profundidade média, e, características hidrológicas, especialmente o tempo de residência da água,

determinaram o nível trófico do ambiente.

Pesquisas em campo devem ser realizadas por especialistas, as informações cruzadas com registros cadastrais antropológicos e a avaliação biológica sobre as espécies de peixes afetadas e outras espécies do meio animal e vegetal. Essas informações podem ser implementadas no modelo AHP de forma qualitativa, diante da inexistência de indicadores ou mapas. Recomenda-se observação dos critérios socioambientais apresentados em Eletrobrás (2000) e Eletrobrás/CEPEL (2007) que possam ser aplicados à geração de informações possíveis de serem apresentadas em mapas na fase de prospecção.

Os geoindicadores ambientais são instrumentos para quantificação das alternativas dos sistemas de apoio a decisão. O refinamento dos estudos de geoindicadores ambientais deve contribuir para a gestão dos potenciais hidroelétricos nas fases de planejamento, execução, monitoramento e controle, durante o ciclo de vida dos projetos hidroelétricos. Os conceitos de gestão de projetos hidroelétricos ajustam-se às práticas em gerenciamento de projetos adotados pelo PMI/PMBok (2008).

3.9.7 Escolha das Alternativas de potenciais hidroelétricos

Foram escolhidos 27 aproveitamentos existentes em PCH e UHE distribuídos aleatoriamente na bacia do rio Doce com potencia bruta outorgada variando de 6 MW a 330.000 MW. Também foram definidas 20 localizações de potenciais em função do valor do número digital do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto variando de 76 a 65.025, distribuídos nas 9 sub-bacias da bacia do rio Doce. A Tabela 3.10 apresenta as distribuições por classes de número digital de favorabilidade ao potencial bruto para todas as alternativas estudadas.

A Figura 3.38 apresenta a distribuição espacial das 47 alternativas, ou potenciais hidroelétricos numerados (Pot_X), para serem analisadas pelo método AHP:

As classes na Tabela 3.10 foram estabelecidas para avaliações empíricas de favorabilidade ao potencial bruto e priorização de potenciais em gráficos de boxplot, no sentido para verificar uma tendência central dos dados, uma medida de posição e observar existência de *outliers*, após a aplicação da metodologia AHP.

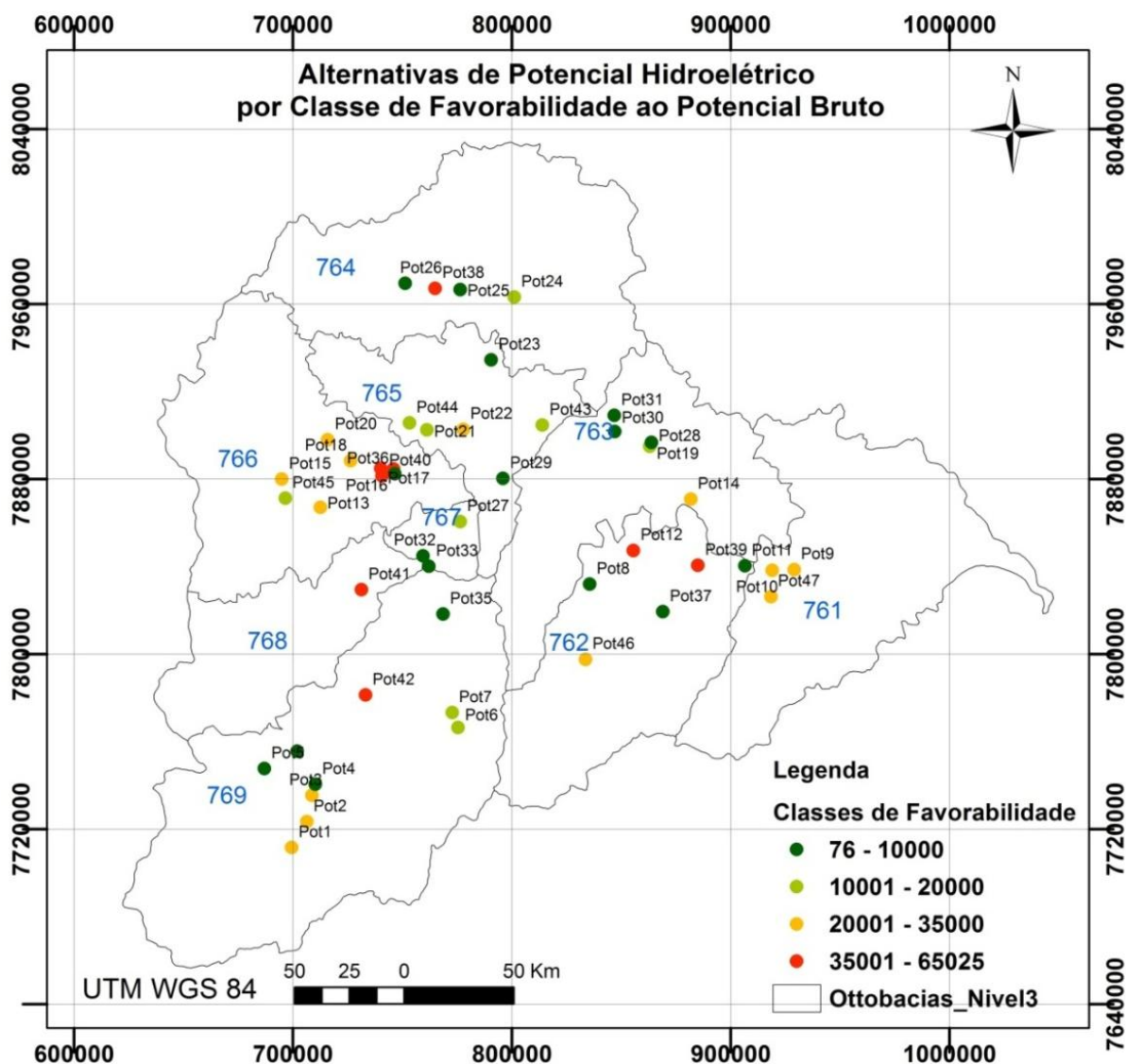


Figura 3.38. Distribuição espacial das alternativas por classes de favorabilidade ao potencial bruto.

Tabela 3.10. Distribuições por classe de Favorabilidade ao Potencial Bruto.

| Classes de Número Digital de Potencial Bruto | Número de Alternativas Existentes (PCH e UHE) | Número de Alternativas Propostas | Número Total de Alternativas Estudadas |
|--|---|----------------------------------|--|
| 0 a 10.000 | 7 | 10 | 17 |
| 10.000 a 20.000 | 6 | 3 | 9 |
| 20.000 a 35.000 | 11 | 2 | 13 |
| 35.000 a 65.025 | 3 | 5 | 8 |

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

Para a vazão média de longo período (Q_{mlp}) foram analisados dados gerados pelo método de vazão média por meio da vazão específica e área de drenagem à montante, processadas em SIG (ÁVILA *et al.*, 2003) e pelo método de Regressão Ponderada Geograficamente – GWR (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002). O método GWR aplicado à regionalização hidrológica das vazões extremas (máxima – Q_{max500} e mínimas - $Q_{7,10}$ e Q_{95}) foi avaliado em relação aos dados do programa Hidrotec. Não foram encontrados em bibliografias acadêmicas resultados de estudos em regionalização hidrológica por GWR. No entanto, os resultados foram comparados com outros métodos de regionalização tradicionais em hidrologia ou dados de séries históricas para demonstrar os requisitos e a aplicabilidade do modelo GWR.

4.1.1 Regionalização da Vazão Média de Longo Período

4.1.1.1 Vazão Específica de Longo Período

As vazões específicas conhecidas da bacia do rio Doce apresentam baixa dispersão quando são limitadas às otobacias nível 3 adotadas pela ANA. Para 469 localidades com informações de vazões específicas do programa Hidrotec foram identificados somente 6 valores “outliers” (Figura 4.1) e os desvios padrões das vazões específicas variando de 0,01 a 0,84 dentro de uma mesma sub-bacia.

A equação de regressão para toda a bacia que relaciona a vazão específica local com as variáveis independentes de área de precipitação média de longo período no local, área de drenagem e vazão específica média na sub-bacia indica uma correlação de Pearson de 95,1%.

Diferente dos resultados encontrados na bacia do São Francisco no trabalho de Pruski *et al.* (2004), na bacia do rio Doce não há elevada correlação entre a redução da vazão específica e a elevação da área de drenagem à montante (Tabela 4.1). No entanto, permanece a premissa da baixa variabilidade da vazão específica em pequenas sub-bacias hidrográficas. Ajustes de curvas entre as variáveis para todas as bacias demonstram baixas correlações entre as variáveis áreas de drenagem, vazão específica, precipitação média e vazão específica por sub-bacias (Figura 4.2).

Entretanto, conforme os resultados apresentados em Pruski *et al.* (2004) verifica-se que a vazão específica é menor nas proximidades das regiões litorâneas, próximos aos exutórios das bacias hidrográficas.

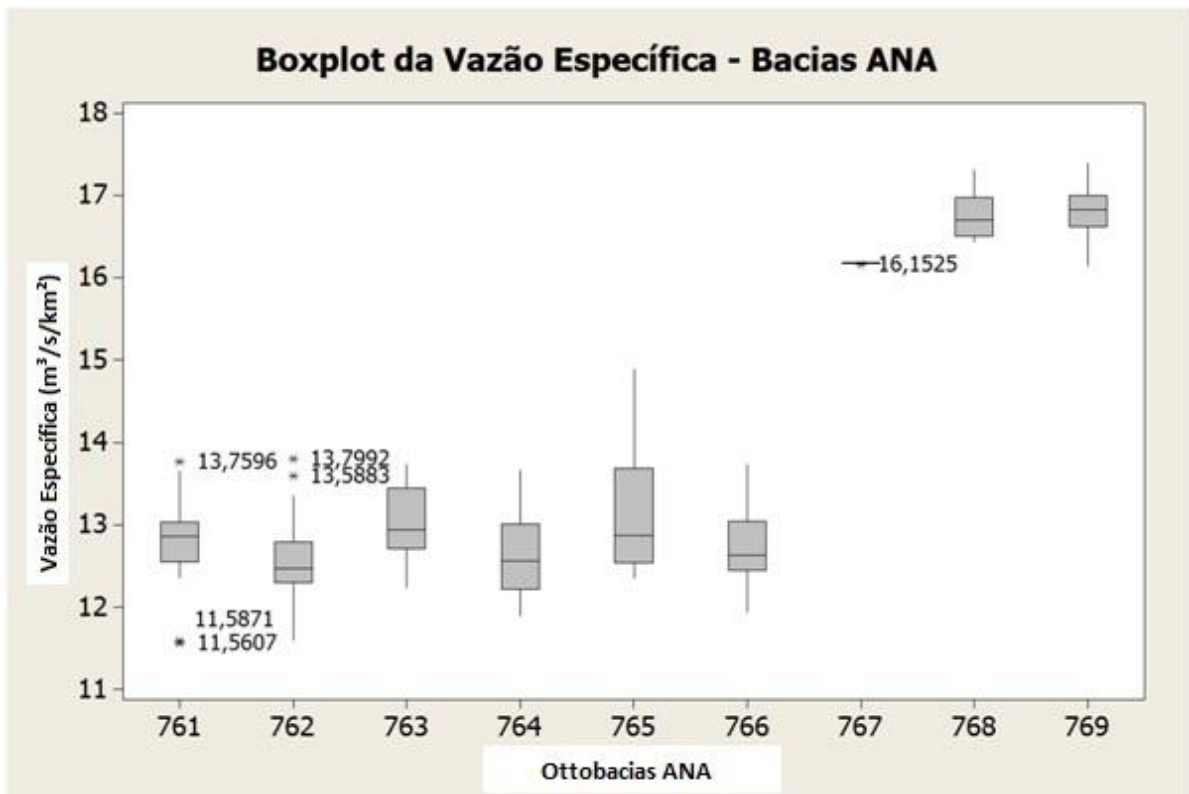


Figura 4.1. BoxPlot das vazões específicas das sub-bacias ANA (Ottobacias nível 3).

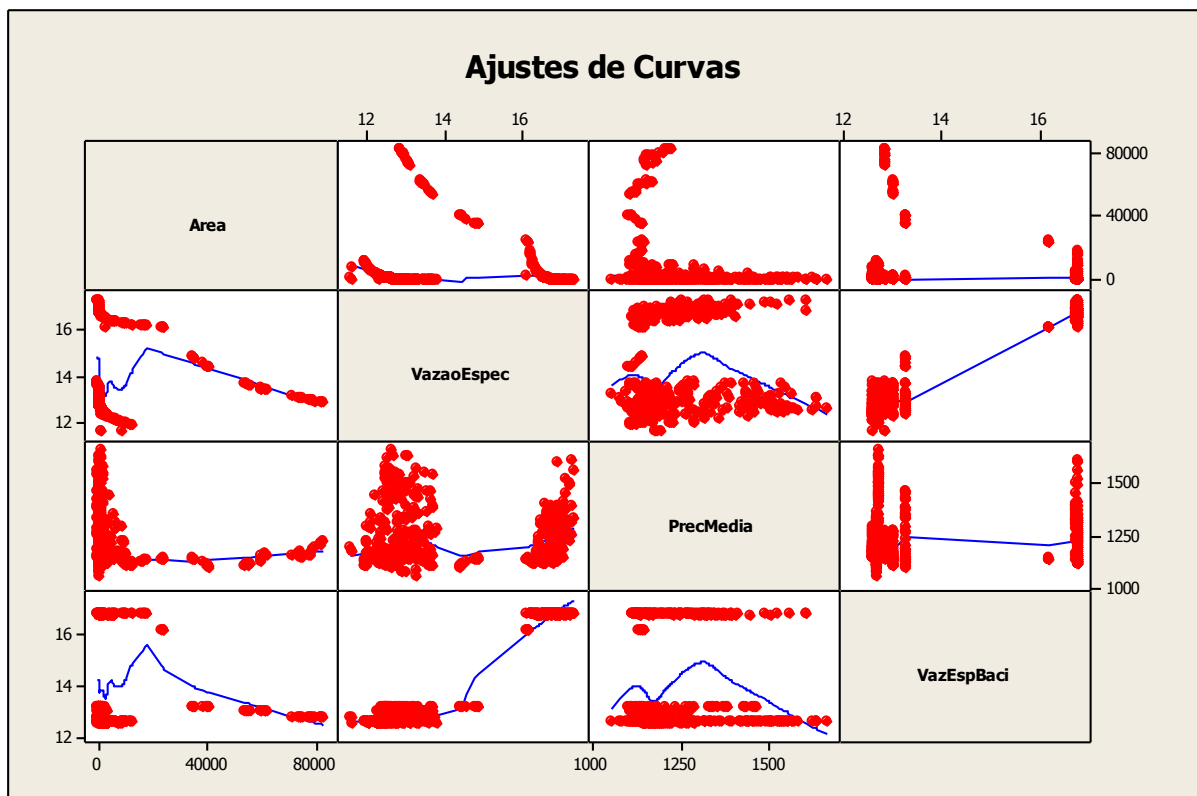


Figura 4.2. Verificação da não ocorrência de ajuste curvas entre variáveis de área de acumulação e precipitação média relacionadas às vazões específicas nas sub-bacias e na bacia hidrográfica.

As informações de área de drenagem à montante das sub-bacias, vazões específicas, precipitação das estações de medição são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Informações hidrométricas do programa Hidrotec, fisiográficas e climáticas nas sub-bacias.

| Sub-bacia | Nº Observações | Area Drenagem na Sub-bacia (km²) | Vazão Específica Máxima (l.s ⁻² .km ⁻²) | Vazão Específica Mínima (l.s ⁻² .km ⁻²) | Vazão Específica Média nas Estações (l.s ⁻² .km ⁻²) | Desvio Padrão Vazão Específica | Precipitação Média Anual nas Estações (mm) |
|-----------|----------------|----------------------------------|--|--|--|--------------------------------|--|
| 761 | 70 | 82462,04 | 13,76 | 11,56 | 12,80 | 0,40 | 1179,91 |
| 762 | 51 | 8876,56 | 13,80 | 11,59 | 12,58 | 0,42 | 1182,64 |
| 763 | 51 | 62582,67 | 13,73 | 12,23 | 13,00 | 0,43 | 1163,74 |
| 764 | 60 | 12369,53 | 13,65 | 11,89 | 12,65 | 0,51 | 1172,70 |
| 765 | 39 | 41110,95 | 14,89 | 12,35 | 13,24 | 0,84 | 1264,56 |
| 766 | 63 | 10458,65 | 13,73 | 11,94 | 12,67 | 0,45 | 1454,47 |
| 767 | 5 | 24588,01 | 16,18 | 16,15 | 16,17 | 0,01 | 1139,20 |
| 768 | 26 | 5462,23 | 17,30 | 16,43 | 16,76 | 0,25 | 1319,50 |
| 769 | 132 | 18111,81 | 17,37 | 16,14 | 16,79 | 0,29 | 1226,62 |

A equação de mais alta correlação (0,951) entre as variáveis testadas para estimativa da vazão específica para a amostra de 469 informações hidrométricas é a seguinte:

$$VazaoEspec = - 1,11 + 0,000006 Area + 0,000777 PrecMedia + 1,01 VazEspBacia$$

Com os seguintes valores de regressão linear e análise de variância (ANOVA):

$$S = 0,428125 \quad R-Sq = 95,1\% \quad R-Sq(adj) = 95,1\%$$

| Origem | DF | SS | MS | F | P |
|-----------|----|---------|--------|---------|-------|
| Regressão | 3 | 1753,33 | 584,44 | 3188,62 | 0,000 |

Onde: *VazaoEspec* = vazão específica no ponto estudado; *Area* = área de contribuição a montante do ponto estudado (estação); *PrecMedia* = *precipitação média* de longo período; *VazEspBacia* = vazão específica na bacia; *DF* = graus de liberdade; *SS* = soma de quadrados; *MS* = quadrados médios; *F* = teste F, representado pela razão entre os quadrados médios dos valores tratados e os quadrados médios dos resíduos; *P* é o Valor P para avaliar a significância estatística do F.

A mesma equação normalizada é:

$$VazEspec_N = 0,00000 + 0,0533 Area_N + 0,0509 PrecMedia_N + 0,980 VazEspecBac_N$$

O símbolo "_N" significa que os valores foram normalizados antes da regressão. Os resultados demonstram a baixa variabilidade da vazão específica nas sub-bacias da bacia do rio Doce e a representatividade das amostras de vazões específicas em estações para estimar a vazão específica na sub-bacia em ottobacias nível 3.

4.1.1.2 Geração do mapa de informações distribuídas das vazões específicas e vazão média de longo período.

As vazões específicas em locais que simulam as estações da ANA foram interpoladas por método Kernel e foi realizada a máscara sobre os locais com área de drenagem à montante (A_i) conhecida. A Figura 4.3 representa o mapa de vazão média de longo período em medidas de litros por segundo por quilômetros quadrados ($l/s/km^2$) e grade de células de 90 x 90 metros, superposto ao mapa de área de drenagem à montante composto pelas células A_i de 90 por 90 metros, conforme a equação: $\bar{Q}_{mlp} = \bar{Q}_{esp} \times A_i$.

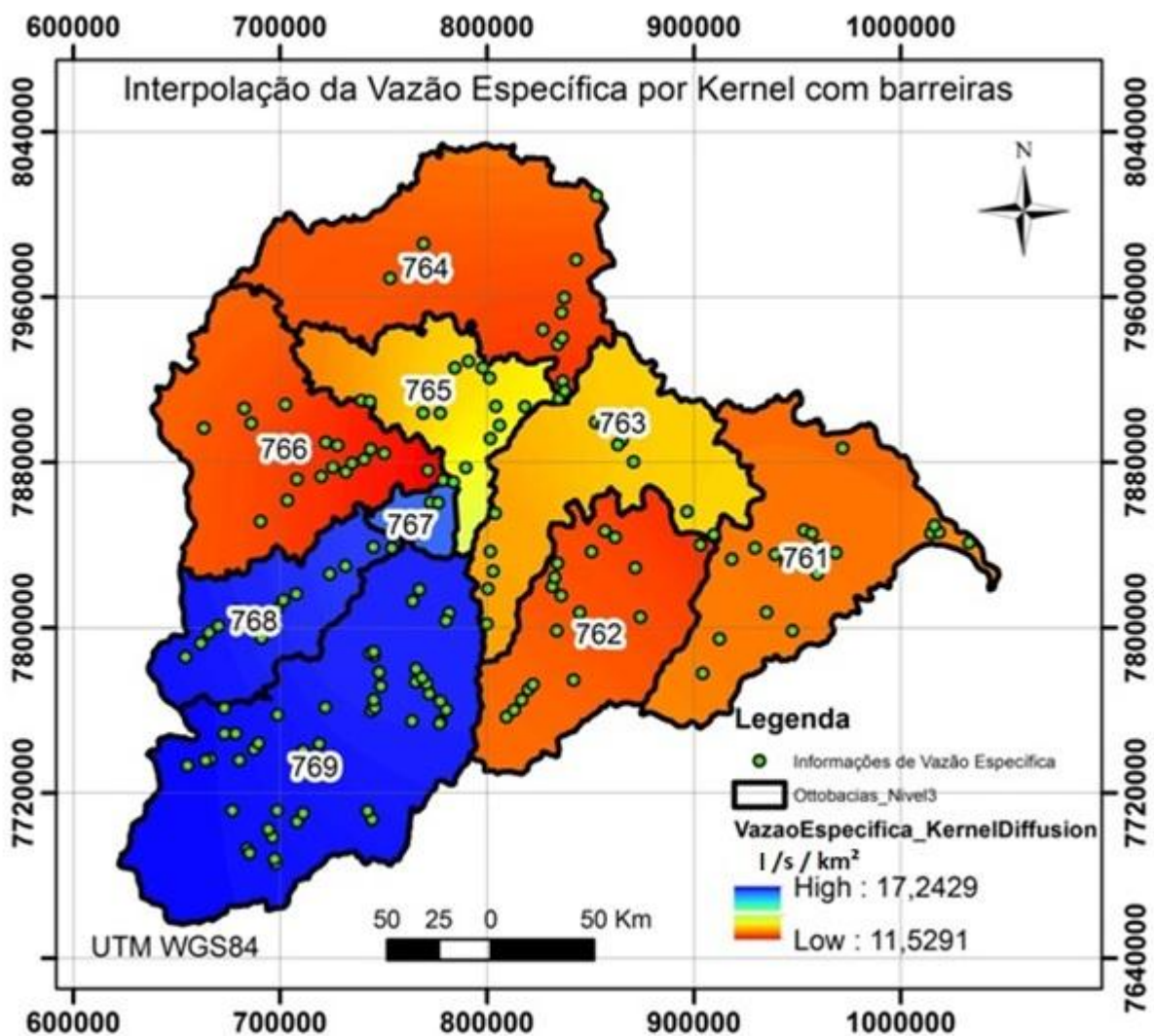


Figura 4.3. Interpolação da vazão específica em fronteiras de ottobacias nível 3.

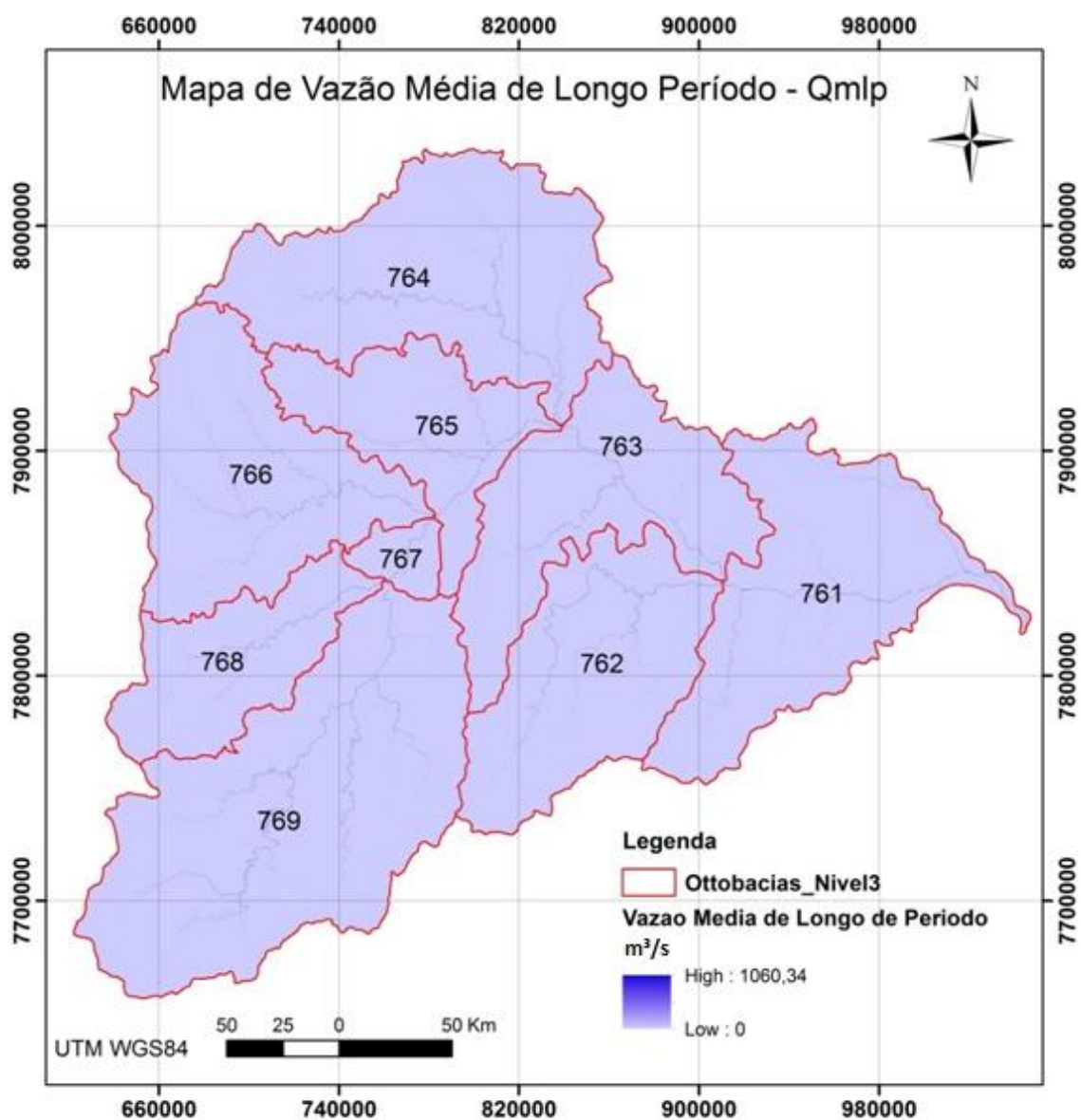


Figura 4.4. Mapa da vazão média de longo período - Qmlp.

4.1.1.3 Resultados entre geração do mapa de Q_{mlp} pelo método das vazões específicas comparados com os valores do programa Hidrotec.

Os resíduos entre os valores de Q_{mlp} do Hidrotec e os valores Q_{mlp} calculados pela regionalização da vazão específica, resultaram em desvio padrão de 7,295 e média do erro padrão de 0,327, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Estatística descritiva dos resíduos Q_{mlp} pelo método GWR e pelo método da vazão específica.

| Média | Média do Erro Padrão | Desvio Padrão | Mínimo | Primeiro Quartil | Mediana | Terceiro Quartil | Máximo |
|-------|----------------------|---------------|---------|------------------|---------|------------------|--------|
| 1,366 | 0,327 | 7,295 | -14,716 | -0,462 | 0,012 | 0,232 | 44,815 |

4.1.1.4 Avaliação do mapa de Q_{mlp} pelo método GWR

A estatística descritiva dos resíduos pelo método GWR é apresentada na Tabela 4.3. Nesse método GWR foram utilizadas 161 amostras para a predição de 497 valores de Q_{mlp} . Considerando a área de drenagem da bacia hidrográfica do rio doce de 82.462,1 Km², esse valor corresponde a taxa de 1 (uma) amostra (ou estação fluviométrica) para 512,19 quilômetros quadrados.

Tabela 4.3. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 497 informações hidrológicas do programa Hidrotec para Q_{mlp} .

| Média | Média do Erro Padrão | Desvio Padrão | Mínimo | Primeiro Quartil | Mediana | Terceiro Quartil | Máximo |
|--------|----------------------|---------------|---------|------------------|---------|------------------|--------|
| -0,914 | 0,565 | 12,595 | -31,293 | -6,452 | -2,546 | 2,227 | 62,797 |

O sumário estatístico do modelo GWR aplicado para alcançar os melhores ajustes de predição da vazão Q_{mlp} está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de Q_{mlp} .

| | |
|--------------------------|-----------------------------|
| Largura de Banda | 356.788 |
| Resíduos ao Quadrado | 40.985 |
| Número Efetivo | 3,72 |
| Sigma | 16,14 |
| AICc | 1357,83 |
| R^2 | 0,996 |
| R^2 Ajustado | 0,996 |
| Variável Dependente | Q_{mlp} |
| Variável Independente 01 | Área de Drenagem a Montante |
| Variável Independente 02 | Precipitação Média Anual |

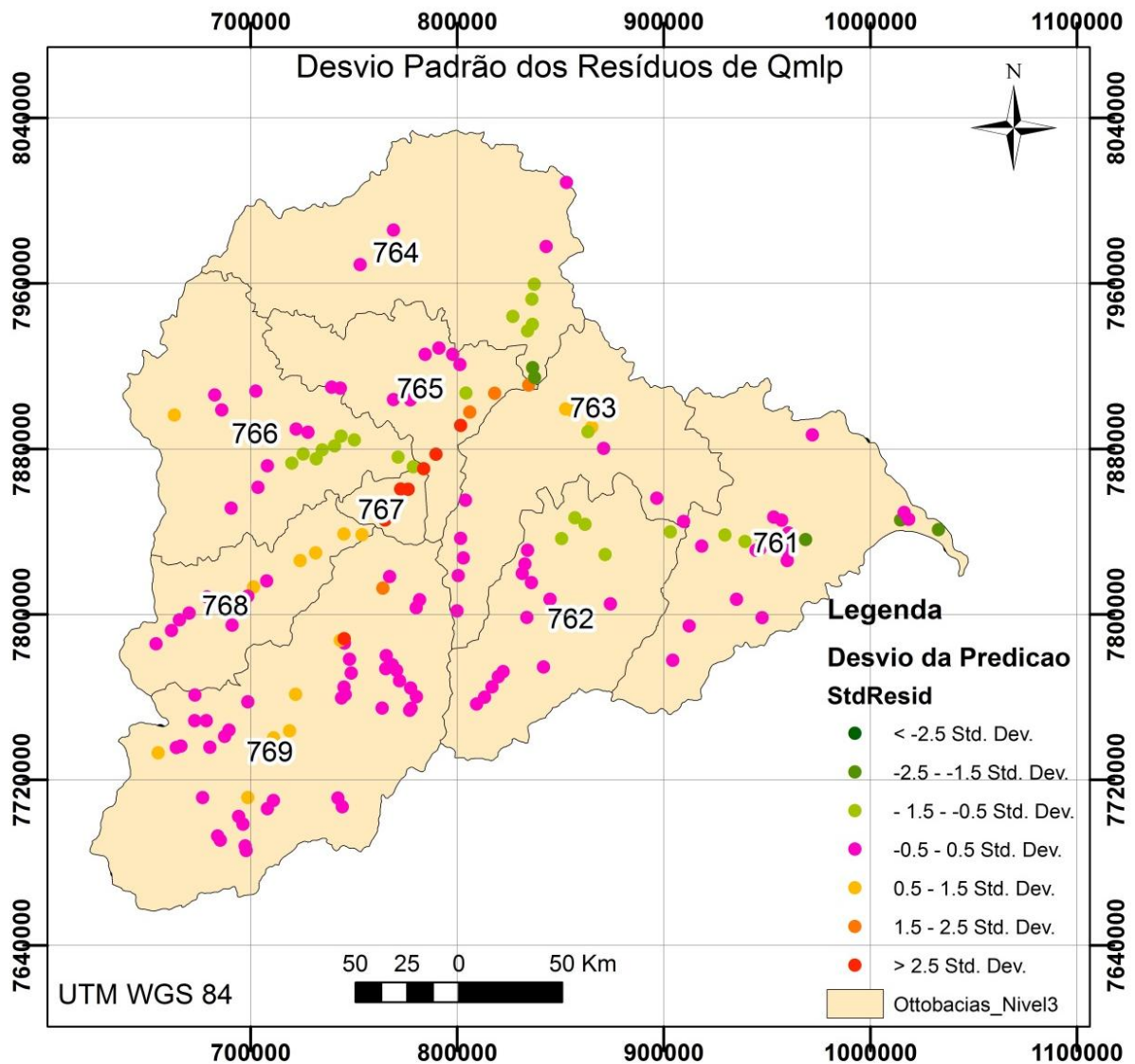


Figura 4.5. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para Qmlp.

4.1.1.5 Comparação entre o método GWR e o Método do Qmlp pela Vazão Específica

O método GWR e o método pela vazão específica baseado na equação $\bar{Q}_{mlp} = \bar{Q}_{esp} \times A_i$ foram comparados entre si e entre as informações do Hidrotec para 496 dados de Vazão Média de Longo Período – Qmlp, conforme os ajustes das equações lineares das figuras 4.6, 4.7 e 4.8. As medidas das vazões Qmlp estão em metros cúbicos por segundo (m³/s) e os resíduos, em valores absolutos, respeitam uma distribuição normal.

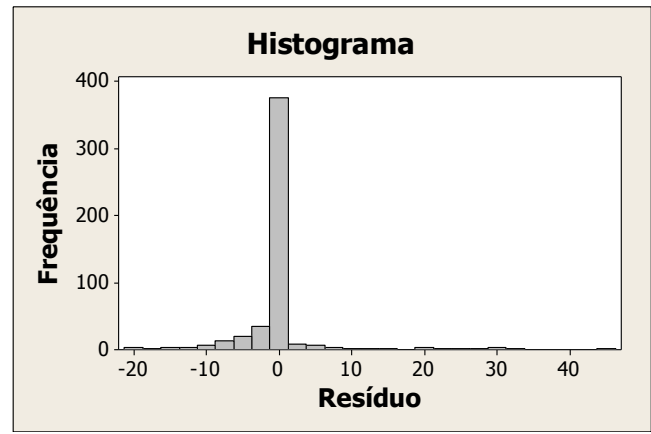
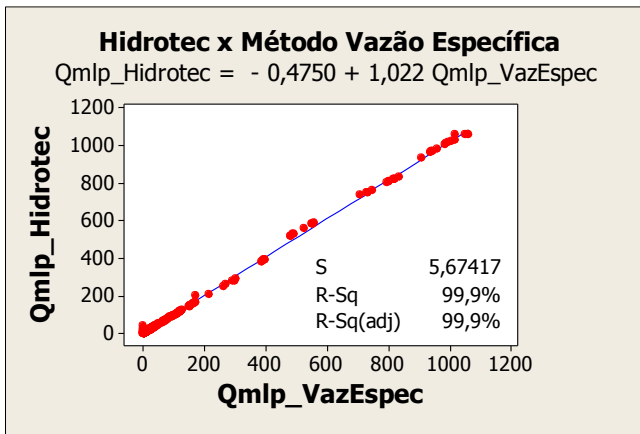


Figura 4.6. Ajuste do método da vazão específica com os dados do Hidrotec para Qmlp.

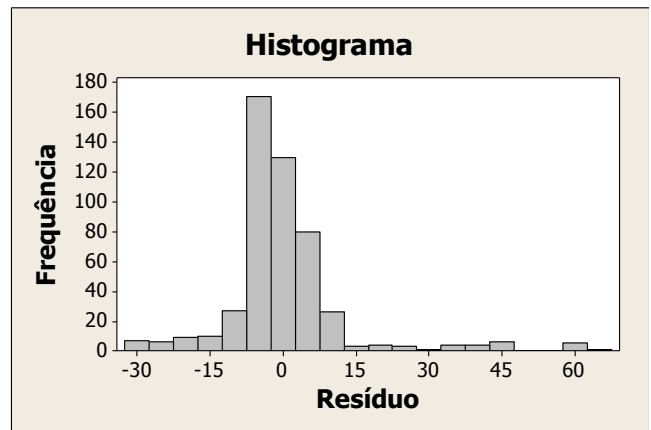
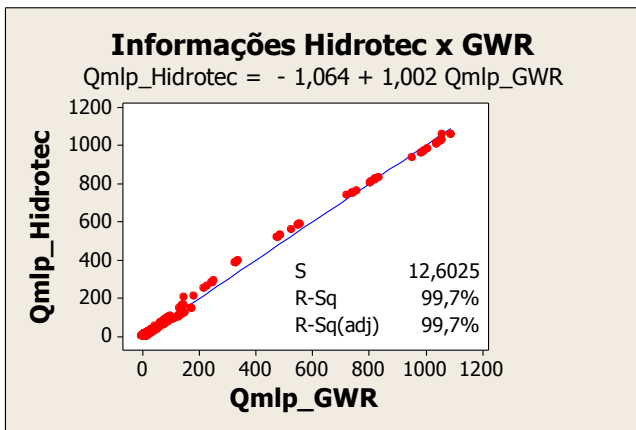


Figura 4.7. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para Qmlp.

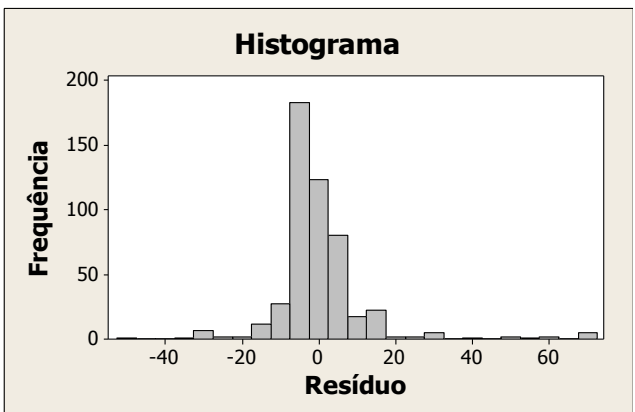
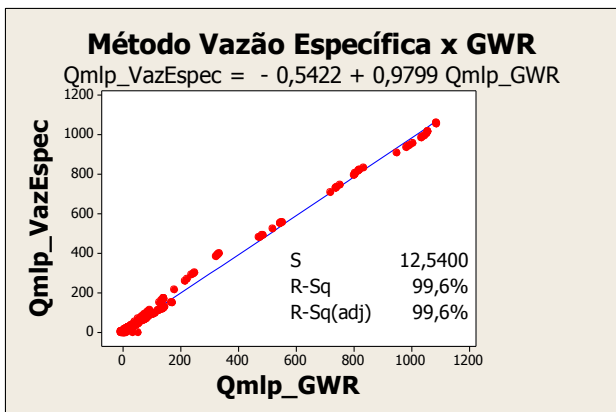


Figura 4.8. Ajuste do método da vazão específica com o método GWR para Qmlp.

4.1.2 Regionalização da Vazão Máxima com Tempo de Retorno de 500 anos (Q_{max500})

São apresentados os resultados da aplicação do método GWR para regionalização de vazão máxima de tempo de retorno de 500 anos, utilizando as variáveis independentes de área de drenagem, precipitação média dos 3 meses mais chuvosos, declividade média no trecho do rio e comprimento do rio à montante. Foram avaliadas 418 informações de Q_{max500} . A correção de Pearson para cada par de valores de Q_{max500}

do Hidrotec e do resultado de Q_{max500} gerado pelo método GWR resultou em 0,986 com valor P de zero.

Tabela 4.5. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 418 informações hidrológicas do programa Hidrotec para Q_{max500} .

| Média | Média do Erro Padrão | Desvio Padrão | Mínimo | Primeiro Quartil | Mediana | Terceiro Quartil | Máximo |
|-------|----------------------|---------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|
| -6,64 | 4,55 | 93,05 | -546,15 | -39,68 | -13,42 | 15,77 | 1223,85 |

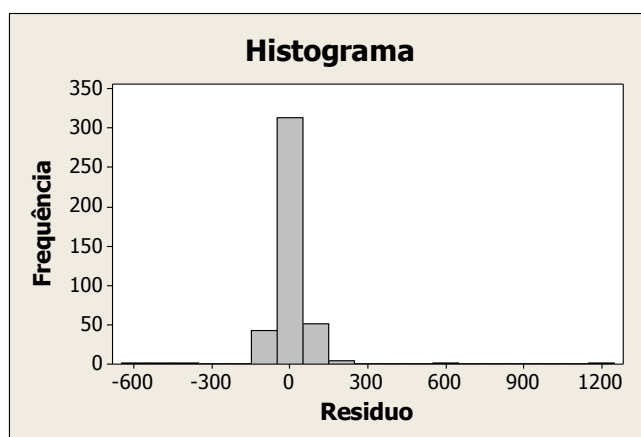
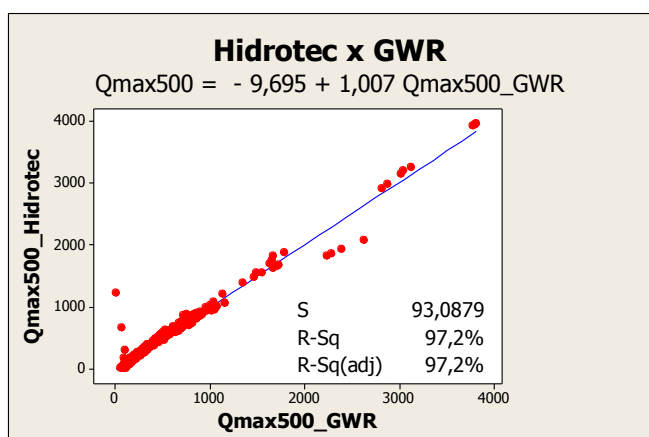


Figura 4.9. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para Q_{max500} .

O sumário estatístico do modelo GWR aplicado para alcançar os melhores ajustes de predição da vazão Q_{mlp} está apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de Q_{max500} .

| | |
|--------------------------|--|
| Largura de Banda | 178.552 |
| Resíduos ao Quadrado | 1.214.077 |
| Número Efetivo | 10,26 |
| Sigma | 89,75 |
| AICc | 1913,89 |
| R^2 | 0,979 |
| R^2 Ajustado | 0,978 |
| Variável Dependente | Q_{max500} |
| Variável Independente 01 | Área de Drenagem a Montante |
| Variável Independente 02 | Declividade Média no Trecho |
| Variável Independente 03 | Precipitação do Trimestre Mais Chuvoso |
| Variável Independente 04 | Comprimento do Rio a Montante |

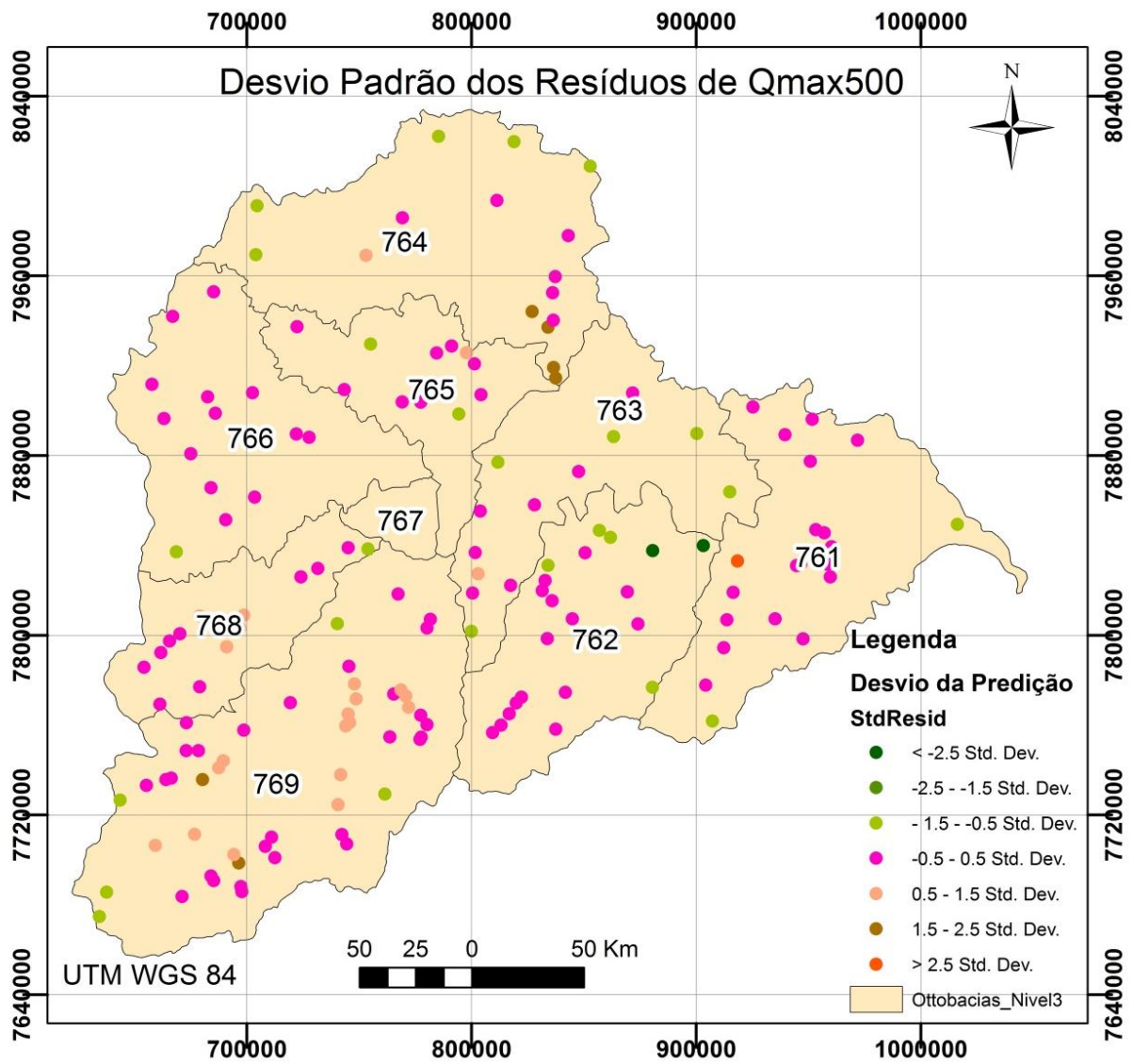


Figura 4.10. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para $Q_{7,10}$.

4.1.3 Regionalização da Vazão Mínima $Q_{7,10}$

São apresentados os resultados da aplicação do método GWR para regionalização de vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, utilizando as variáveis independentes de área de drenagem, precipitação média dos 3 meses mais secos, densidade de drenagem e comprimento do rio à montante. Foram avaliadas 418 informações de $Q_{7,10}$. A correção de Pearson para cada par de valores de $Q_{7,10}$ do Hidrotec e do resultado de $Q_{7,10}$ gerado pelo método GWR resultou em 0,980 com valor P de zero.

Tabela 4.7. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 418 informações hidrológicas do programa Hidrotec para $Q_{7,10}$.

| Média | Média do Erro Padrão | Desvio Padrão | Mínimo | Primeiro Quartil | Mediana | Terceiro Quartil | Máximo |
|--------|----------------------|---------------|---------|------------------|---------|------------------|--------|
| 0,0007 | 0,0466 | 0,9537 | -2,8353 | -0,3924 | -0,0054 | 0,2555 | 8,0625 |

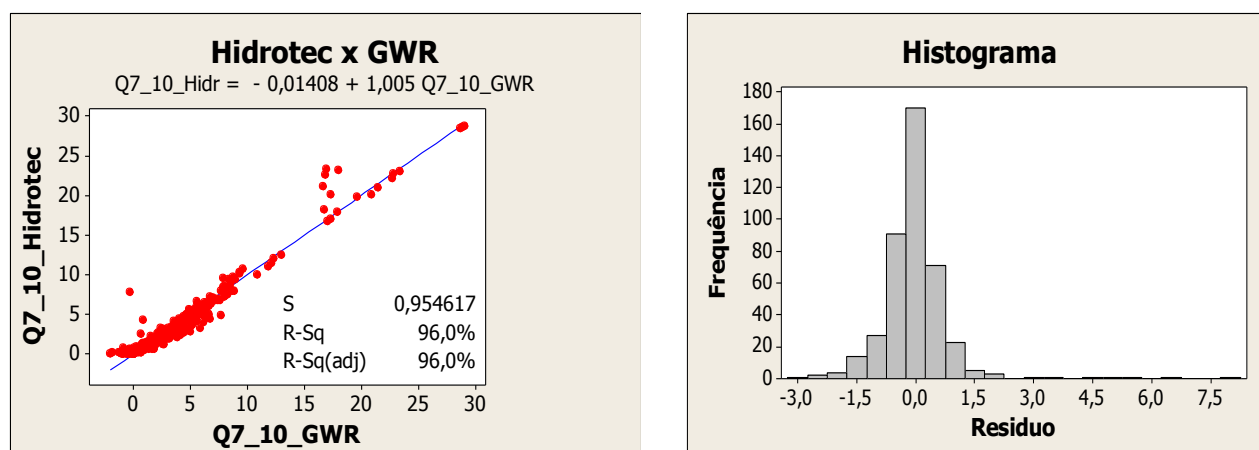


Figura 4.11. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para $Q_{7,10}$.

O sumário estatístico do modelo GWR aplicado para alcançar os melhores ajustes de predição da vazão $Q_{7,10}$ está apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de $Q_{7,10}$.

| | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Largura de Banda | 83.296 |
| Resíduos ao Quadrado | 140 |
| Número Efetivo | 27,92 |
| Sigma | 1,03 |
| AICc | 484,91 |
| R^2 | 0,970 |
| R^2 Ajustado | 0,964 |
| Variável Dependente | $Q_{7,10}$ |
| Variável Independente 01 | Área de Drenagem a Montante |
| Variável Independente 02 | Precipitação do Trimestre Mais Seco |
| Variável Independente 03 | Densidade de Drenagem |
| Variável Independente 04 | Comprimento do Rio a Montante |

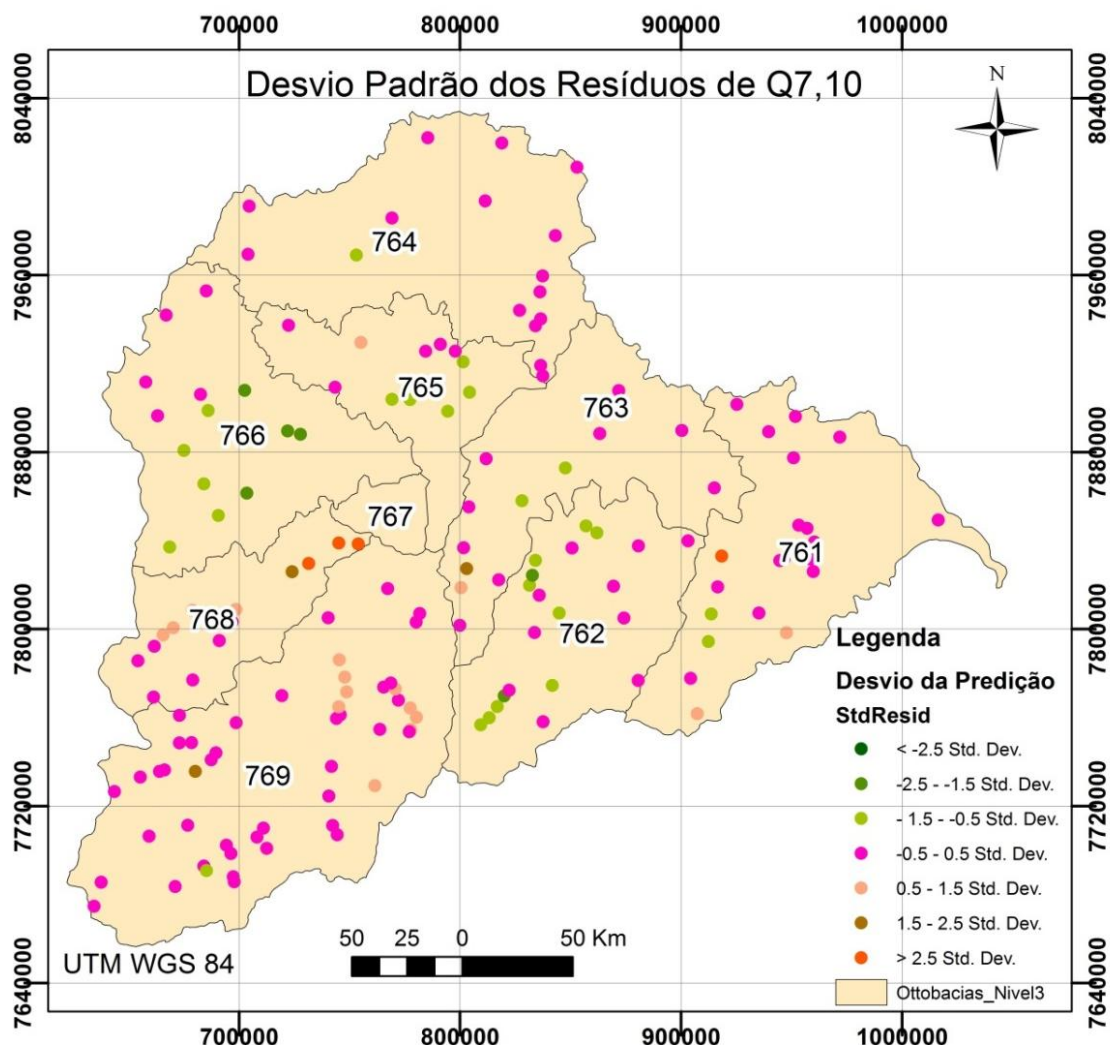


Figura 4.12. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para Q7,10.

4.1.4 Regionalização da Vazão Mínima Q_{95}

São apresentados os resultados da aplicação do método GWR para regionalização curva de permanência para 95% de probabilidade (Q_{95}), utilizando as variáveis independentes de área de drenagem, precipitação média dos 3 meses mais secos, densidade de drenagem e comprimento do rio à montante. Foram avaliadas 418 informações de Q_{95} . A correlação de Pearson para cada par de valores de Q_{95} do Hidrotec e do resultado de Q_{95} gerado pelo método GWR resultou em 0,982 com valor P de zero.

Tabela 4.9. Estatística descritiva dos resíduos entre o método GWR e as 418 informações hidrológicas do programa Hidrotec para Q_{95} .

| Média | Média do Erro Padrão | Desvio Padrão | Mínimo | Primeiro Quartil | Mediana | Terceiro Quartil | Máximo |
|---------|----------------------|---------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|
| -0,0038 | 0,0611 | 1,2482 | -3,5075 | -0,5273 | -0,0204 | 0,3468 | 12,0746 |

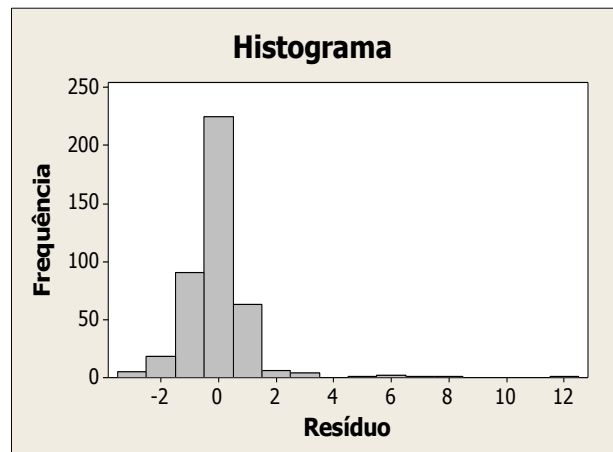
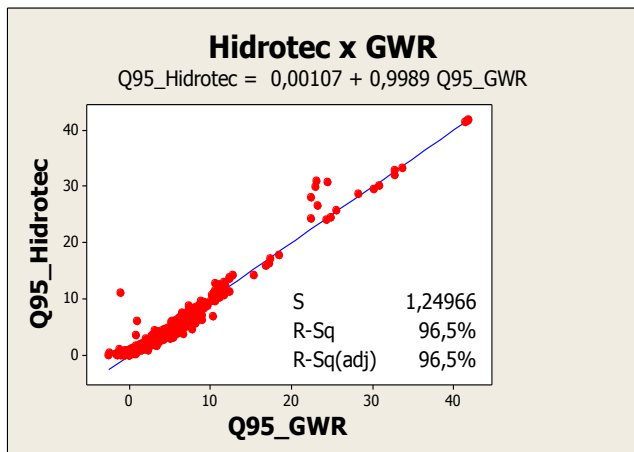


Figura 4.13. Ajuste dos dados do Hidrotec com o método GWR para Q_{95} .

O sumário estatístico do modelo GWR aplicado para alcançar os melhores ajustes de predição da vazão Q_{95} está apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Sumário estatístico do Modelo GWR para predição de Q_{95} .

| | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Largura de Banda | 83296 |
| Resíduos ao Quadrado | 224 |
| Número Efetivo | 27,93 |
| Sigma | 1,29 |
| AICc | 560,86 |
| R^2 | 0,975 |
| R^2 Ajustado | 0,970 |
| Variável Dependente | Q_{95} |
| Variável Independente 01 | Área de Drenagem a Montante |
| Variável Independente 02 | Precipitação do Trimestre Mais Seco |
| Variável Independente 03 | Densidade de Drenagem |
| Variável Independente 04 | Comprimento do Rio a Montante |

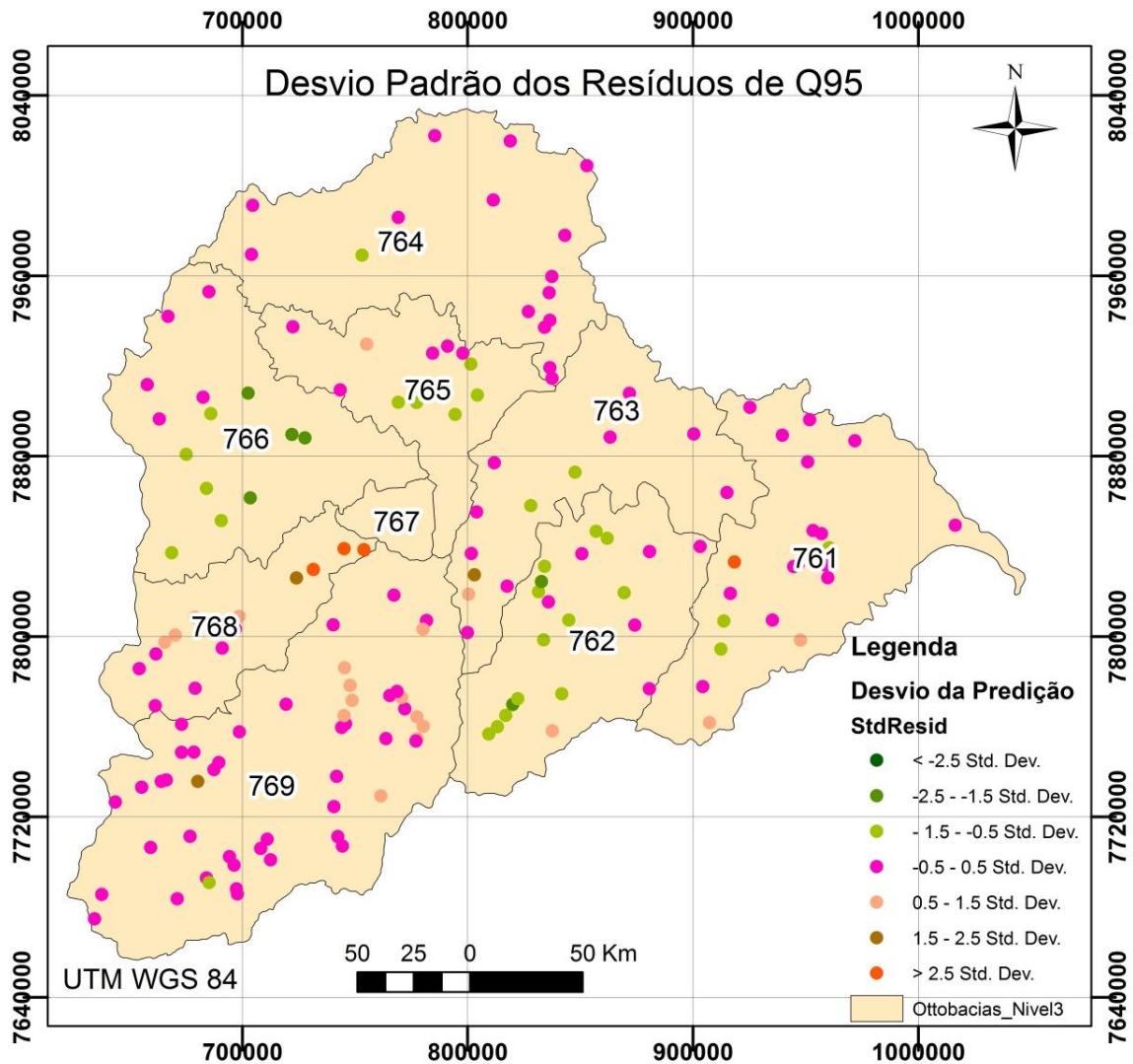


Figura 4.14. Desvio padrão das diferenças entre os valores observados e calculados pelo método GWR para Q95.

4.1.5 Aplicabilidade do método GWR para regionalização de vazões

O método de Regressão Ponderada Geograficamente, ou “Geographically Weighted Regression” (GWR) é uma técnica desenvolvida por Fotheringham *et al.* (2002) para modelagem de processos que variam no espaço. Por ser uma variação de regressão linear com efeitos espaciais locais (CÂMARA, 2002) pode ser aplicada a vários processos em áreas geográficas distintas. As variáveis independentes de significância estatísticas para predição da variável dependente aplicadas nesse trabalho demonstraram a possibilidade de explicação de um modelo para predição de vazões.

As variáveis independentes que não possuem variabilidade no espaço (ex. área de drenagem a montante e comprimento de fluxo a montante) foram determinadas por metodologias que representam o comportamento hidrológico (MAIDMENT e DJOKIC, 2000; MAIDMENT, 2002), utilizando o modelo digital de elevação como a informação primária. Nessa pesquisa esses mapas obtidos por modelagem hidrológica foram gerados para todo o território brasileiro.

Os resultados obtidos das vazões médias e extremas apresentaram altas correlações e significância estatística, R^2 superiores a 0,97 e valor P igual a 0, quando comparados aos valores de vazões adotados no programa Hidrotec (EUCLYDES, 2007).

As variáveis independentes que variam no espaço (ex. mapas de precipitação, variáveis ambientais de vegetação, densidade de drenagem) podem ser obtidas de mapas de abrangência nacional sem limitações da aplicação do método em outras bacias hidrográficas. Os benefícios do rápido processamento e avaliação dos resultados para calibração do modelo e validação dos resultados em forma de mapas de vazões justificam a aplicabilidade do método para primeira estimativa de vazões médias, máximas e mínimas com objetivos de prospecção de potenciais hidroelétricos.

4.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

Os estudos topográficos apresentados são os resultados da geração dos produtos Mapa de Índice Topográfico para identificação de potenciais brutos e dos estudos da localização de eixos barráveis por fatores geomorfométricos.

4.2.1 Mapa de Índice Topográfico

O Mapa do Índice Topográfico, conforme Figura 4.15, indica os locais com maiores favorabilidades à energia cinética (vazão) e à energia potencial (declividades).

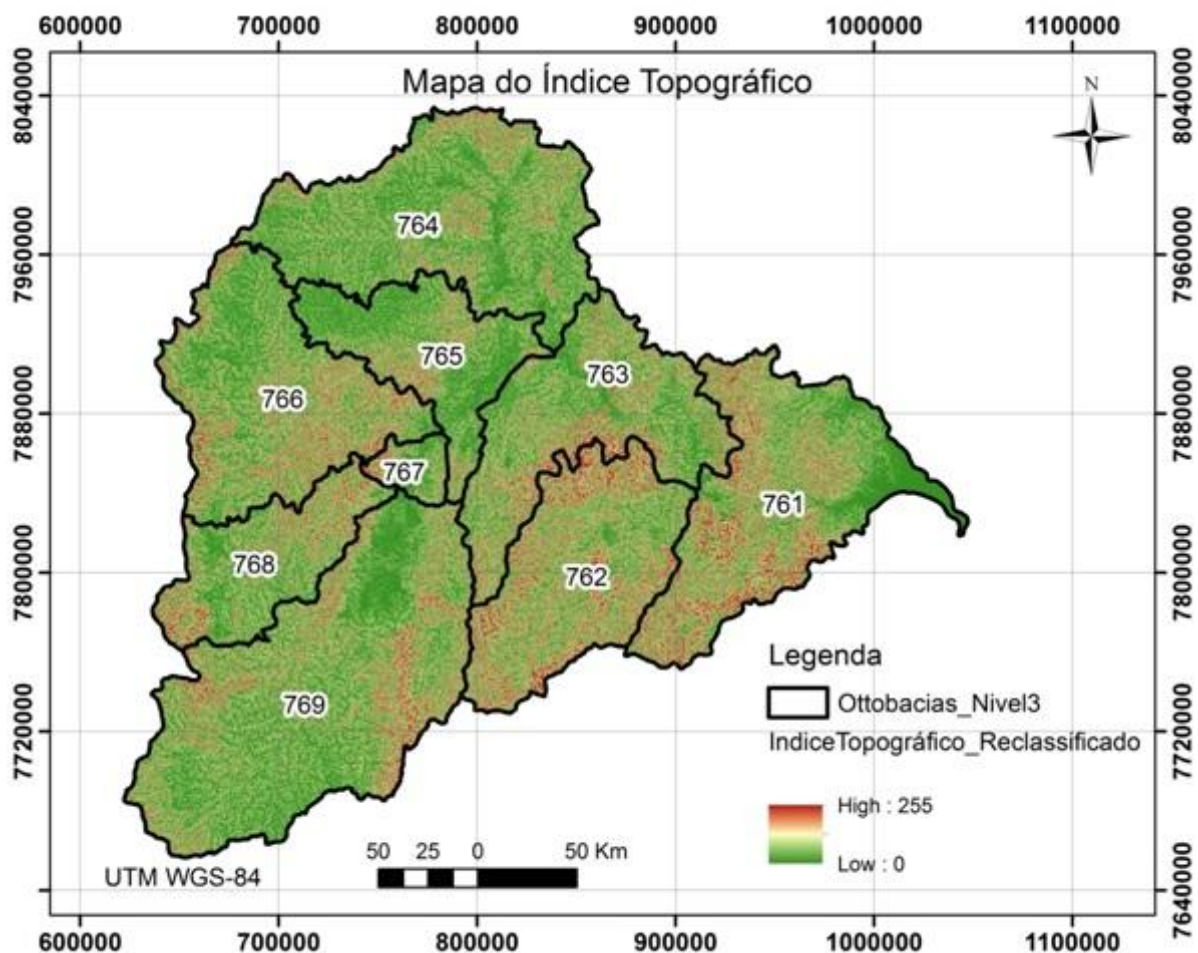


Figura 4.15. Mapa do Índice Topográfico reclassificado em 8 bits.

4.2.2 Resultado da pesquisa preliminar de quedas d'água para o caso da UHE Salto Grande

O mapa de amplitude de altimetria elaborado pelo processo de estatística focal Tomlin (1990), denominado no ArcGIS de "FocalRange", simulado no processo semi-automatizado no ModelBuilder/ArcGIS, está apresentado na Figura 4.16.

Verifica-se que para uma área de influência de 60 pixels (aproximadamente um círculo de 5400 metros de raio para cada pixel) pesquisada no MDE/SRTM, as diferenças de nível alcançam uma amplitude de 123 metros, e a diferença entre o local da barragem Salto Alegre (A) e a casa de força (B), apresenta uma média de variação de 65 metros. Devido às imprecisões do MDE/SRTM, a variação entre esse valor e comparado ao apresentado no "Resumo informativo da Barragem UHE Salto Grande/MG"⁶⁴ resultou em 23,34 metros. No entanto, ao selecionar a área e os rios estudados, foi possível localizar as maiores quedas dentro de um raio de estudo em classes de diferença de nível. Para identificação de alturas mais precisas, é necessária a aplicação do mesmo método a MDE ou MDT de maior acurácia, ou realização de medições topográficas "in loco".

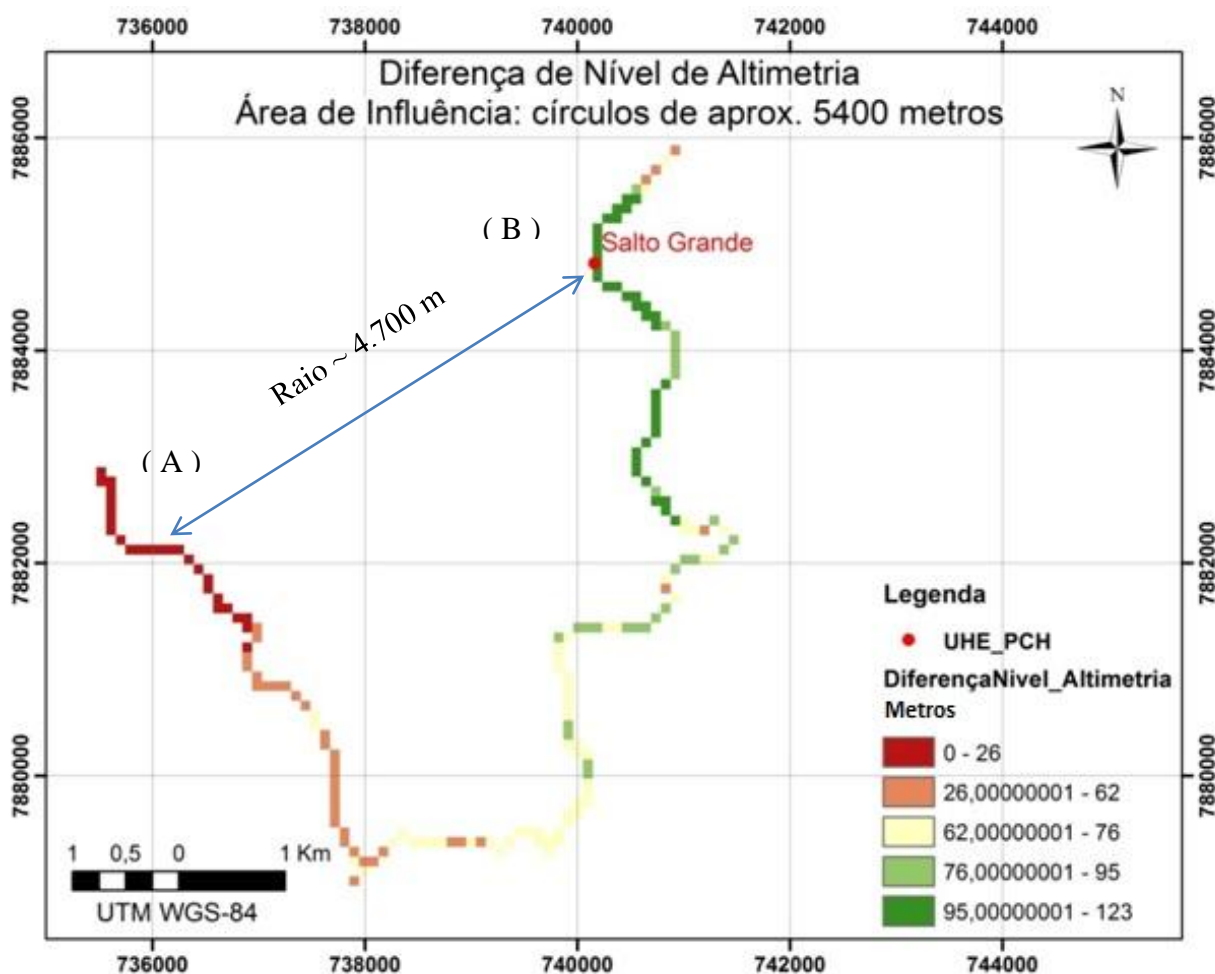


Figura 4.16. Mapa de diferenças de níveis altimétricos.

⁶⁴ Indicado no Capítulo 3, Item 3.4.6.1 – Caracterização do aproveitamento hidroelétrico da UHE Salto Grande.

As opções para a exploração desse aproveitamento eram diversas. Nessa área poderia haver a construção de barramento de altura mais elevada com casa de força (turbina/gerador) próxima. O projetista resolveu tomar partido dos traçados do rio e seus afluentes para aproveitar a maior altura de queda. A solução com maior desempenho foi construção de um duto de quilômetros para alcançar outro rio da bacia à jusante. A região possui outros aproveitamentos hidroelétricos próximos que poderiam ser impactados.

A possibilidade de escolha entre vários cenários factíveis a exploração dos potenciais, sugere a interferência do especialista em geração hidroelétrica na simulação dos melhores arranjos. O processo utiliza aplicativo semi-automatizado para indicação das maiores diferenças altimétricas em uma área delimitada. A aplicação de ferramentas e técnicas de geotecnologias possibilita a rápida obtenção de informações para a tomada de decisão e aumenta a capacidade das combinações dos arranjos para obtenção de respostas mais acuradas.

A metodologia apresentada no estudo de caso para o MDE/SRTM pode ser aplicada a modelos de elevação ou modelos de terreno com maior resolução, possibilitando dados mais acurados de quedas d'água em diferentes arranjos, sob a supervisão de um especialista.

4.2.3 Posicionamento de Eixos Barráveis

Em muitas situações reais o posicionamento do reservatório nem sempre estará próximo ao sistema turbina gerador. No estudo dos eixos barráveis, o projetista estuda em conjunto aspectos da geomorfologia (ex. gargantas de rios), geologia e geotecnia (características litológicas, tipos de rochas, equilíbrio em taludes) para identificar características de estabilidade, deformabilidade e estanqueidade (COSTA, 2012). Na busca por gargantas de rios, a identificação da localização do barramento pode ser observada pela identificação das alturas em relação aos canais de drenagem mais próximos. Um exemplo dessa avaliação pode ser realizado pelo processo HAND. O modelo HAND em 90 metros de resolução foi processado para a área da UHE Salto Grande, na Figura 4.17.

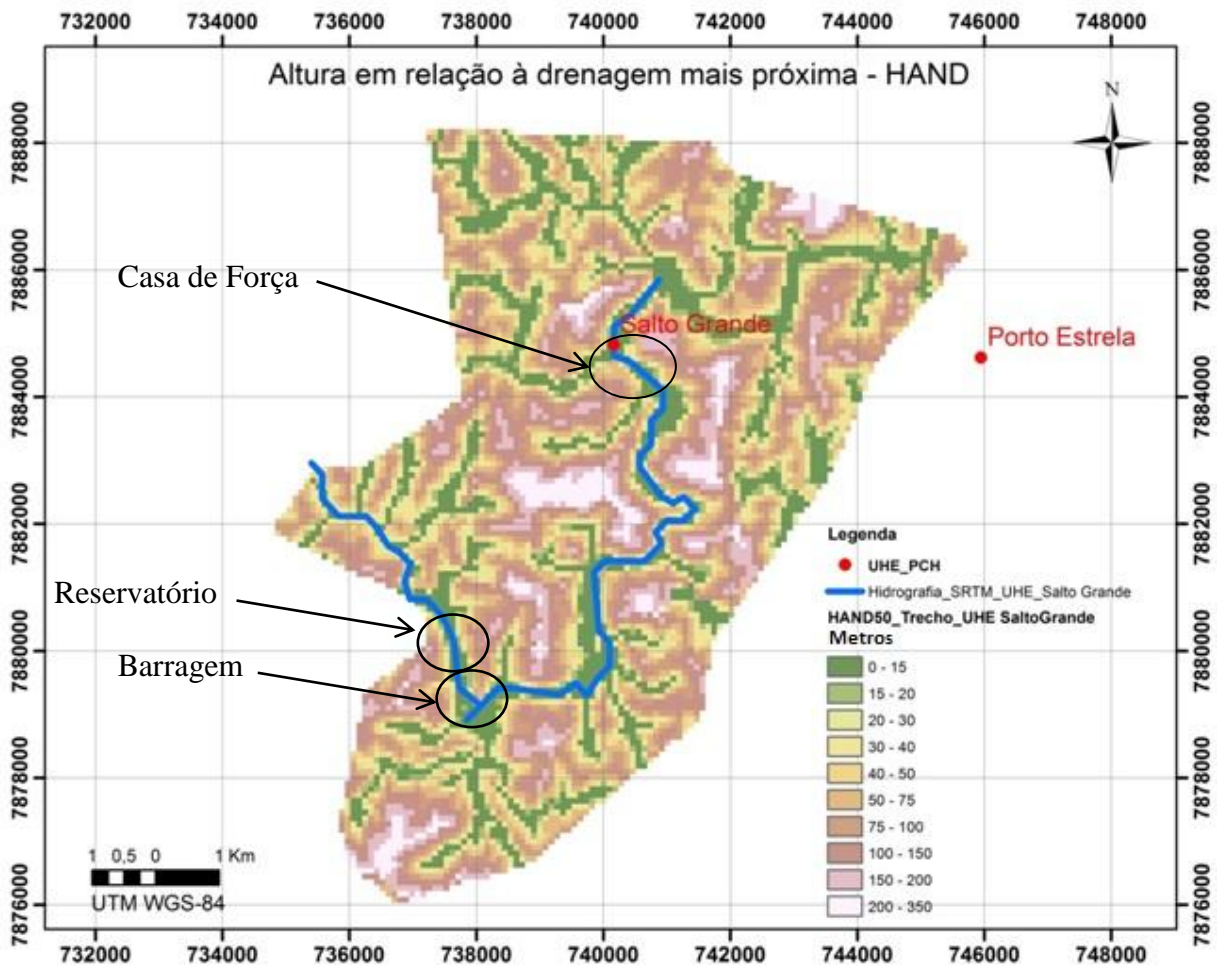


Figura 4.17. Classes de alturas em relação à drenagem mais próxima.

A localização da barragem corresponde à região com proximidade dos estreitamentos das áreas com menores valores de HAND (áreas verdes claro e escuro) e proximidade com as áreas de maiores valores de HAND (tonalidades mais claras em amarelo, salmão e róseo).

Os valores de HAND podem ser destacados em mapas digitais pela determinação da amplitude do HAND em um retângulo de 4x4 células (correspondente a 360 x 360 metros), proporcional ao comprimento do barramento (Figura 4.18). As amplitudes de altura em relação à drenagem mais próxima correspondem às diferenças entre máximo e mínimo de altura à drenagem mais próxima, em áreas retangulares parametrizáveis em função da estimativa do comprimento da barragem.

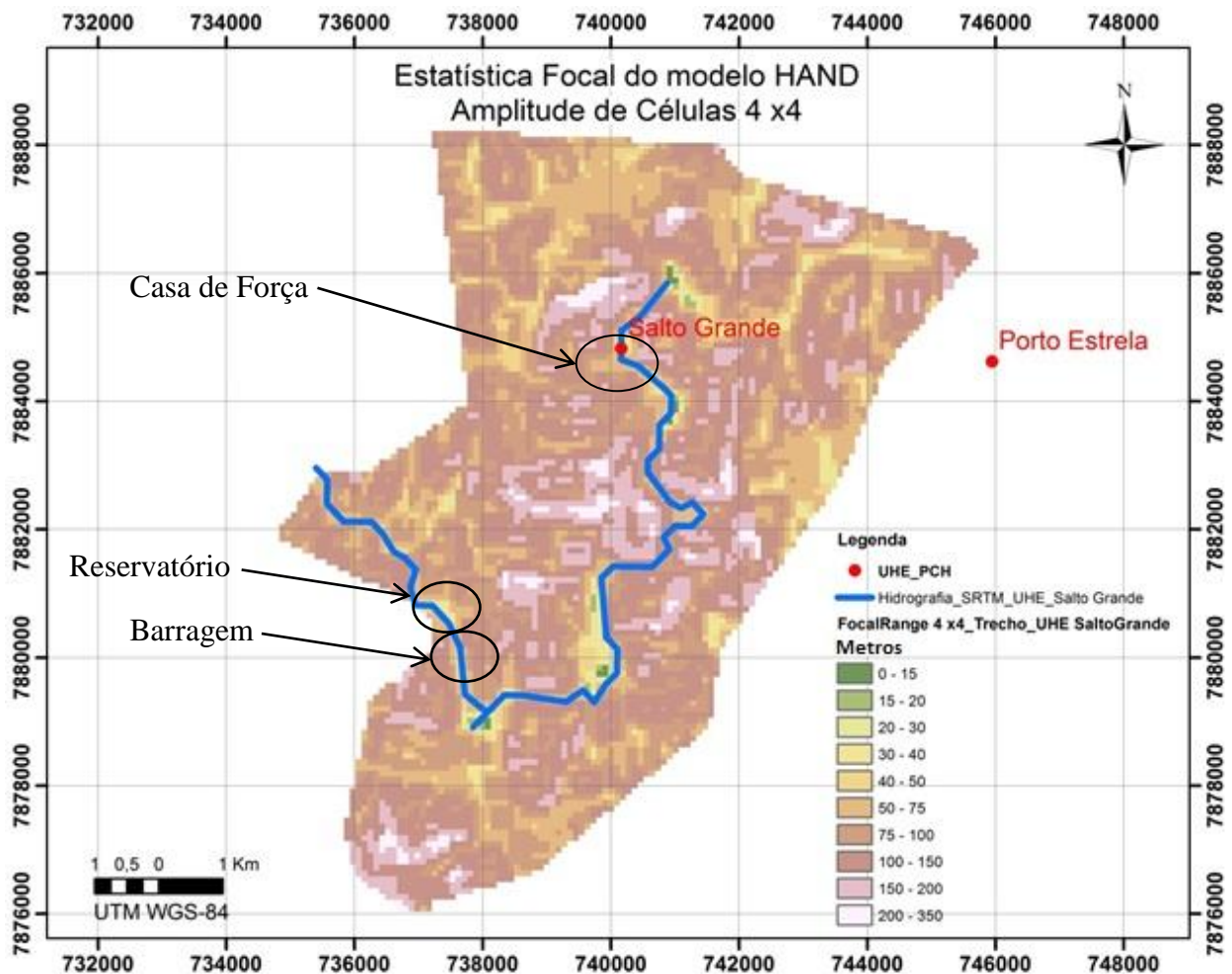


Figura 4.18. Classes de amplitudes de alturas em relação à drenagem mais próxima.

4.3 MAPA DE FAVORABILIDADE AO POTENCIAL BRUTO E MAPAS COMPLEMENTARES

O mapa proposto de favorabilidade ao potencial bruto para a bacia do rio Doce foi elaborado pelo produto do mapa do índice topográfico e do mapa de vazão de longo período, conforme Figura 4.19. O mapa de vazão de longo período e o mapa de índice topográfico foram reclassificados em 8 bits. O produto dos mapas representa o Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto.

Porém, esse mapa não indica valores de potência estimada, em virtude da impossibilidade do conhecimento mais acurado de valores de quedas d'água, na aplicação do modelo SRTM. Mesmo que o modelo digital de elevação alcançasse acurácias superiores ao aplicado nesse trabalho, os recursos de derivações e outros arranjos para maior eficiência energética, justificariam a aplicação de modelagens por processos de otimização (ex. Hydrospt; LARENTIS *et al*, 2010) ou a interferência do especialista para simulações em modelos energéticos.

As pesquisas que utilizam somente as diferenças de quedas entre as células mais próximas das matrizes de elevação, limitam-se a avaliar usinas com casa de força

(complexo turbina-gerador) próxima a queda d'água. Essa solução é aplicada a alguns tipos de aproveitamentos por reservação, e excluem, o uso de adutoras para elevação da energia potencial, solução muito aplicada às PCH em reservatórios a fio d'água ou utilizadas em derivações para elevação da eficiência energética em UHE (ex. Usina Salto Grande, Figura 4.18).

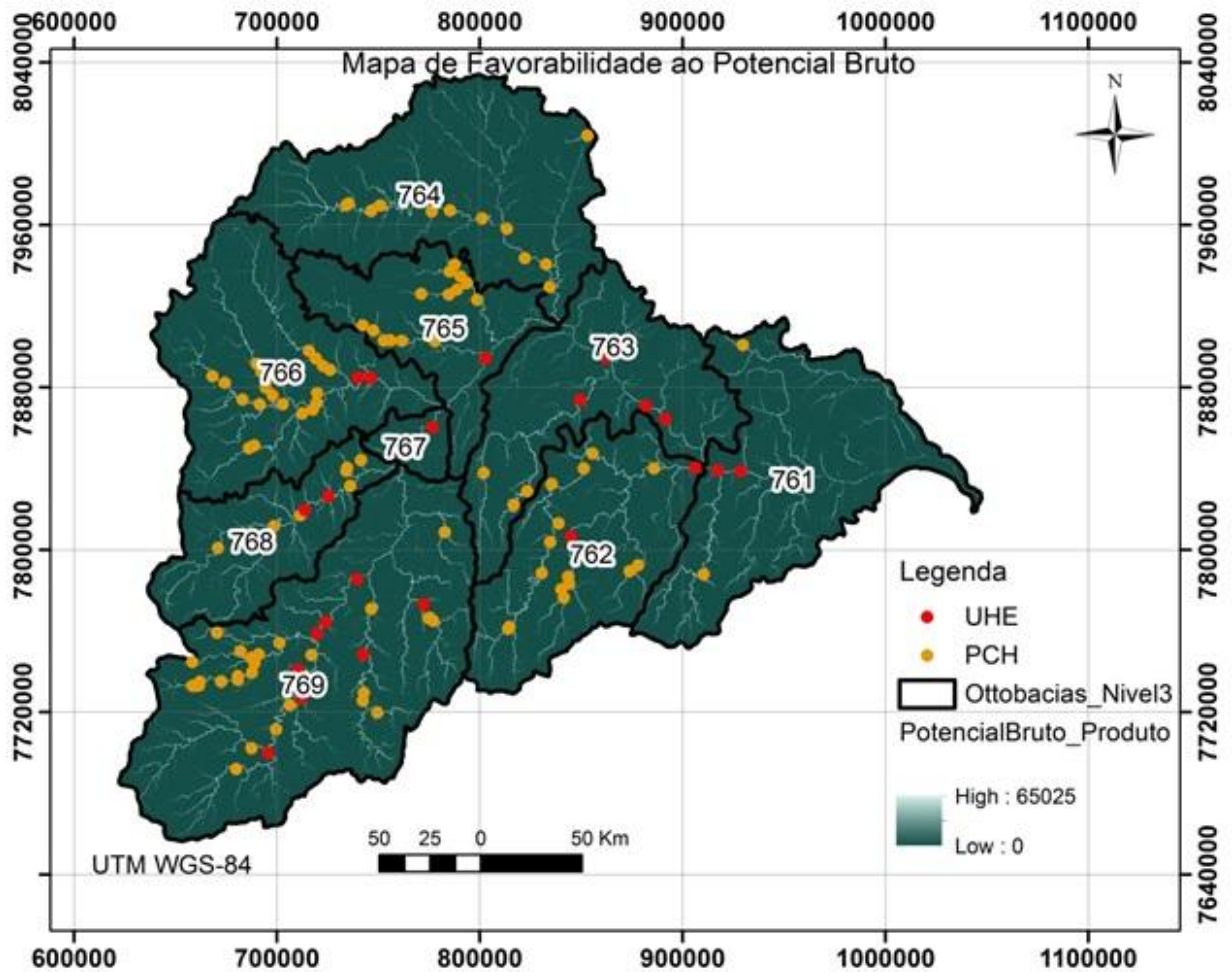


Figura 4.19. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto na bacia do rio Doce.

O Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto é visualizado na Figura 4.20 em 4 níveis de agregação por ottobacias da ANA.

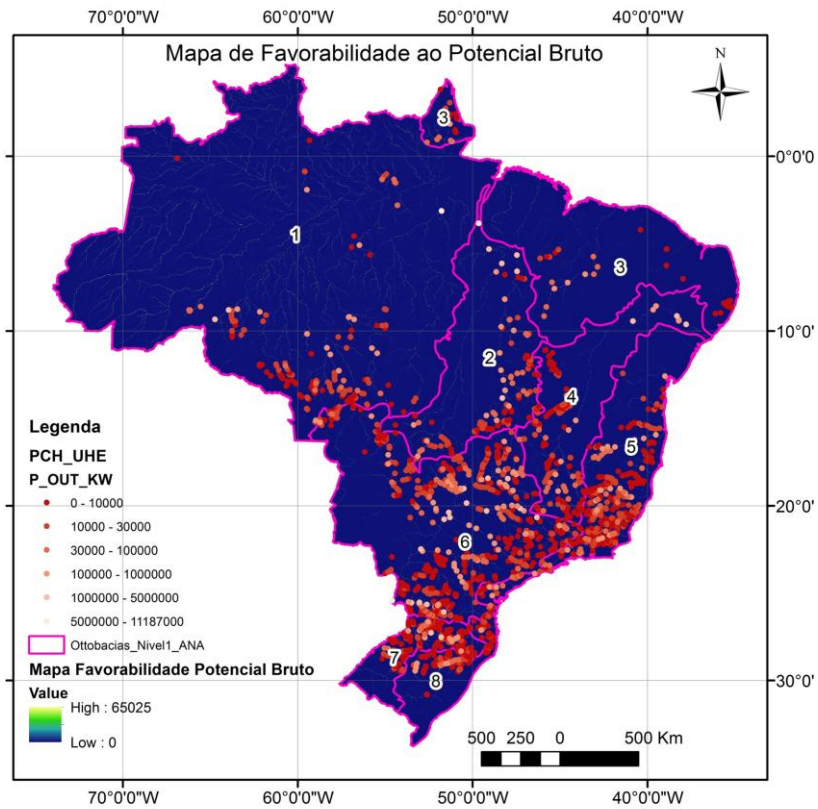


Figura 4.20 a. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto em Ottobacias (Nível 1).

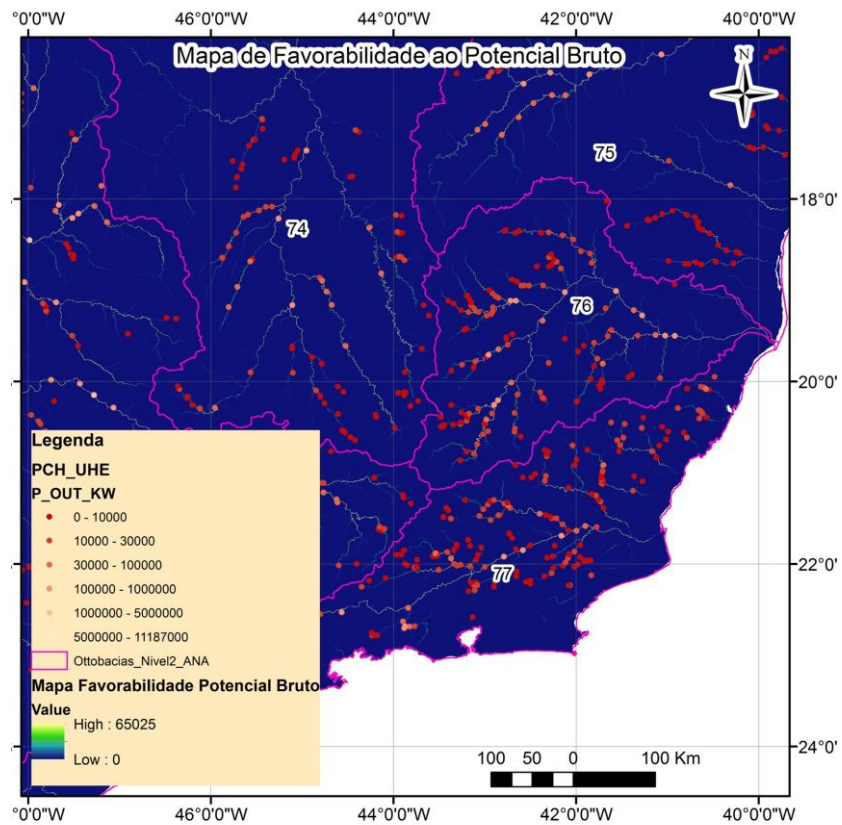


Figura 4.20 b. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto em Ottobacias (Nível 2).

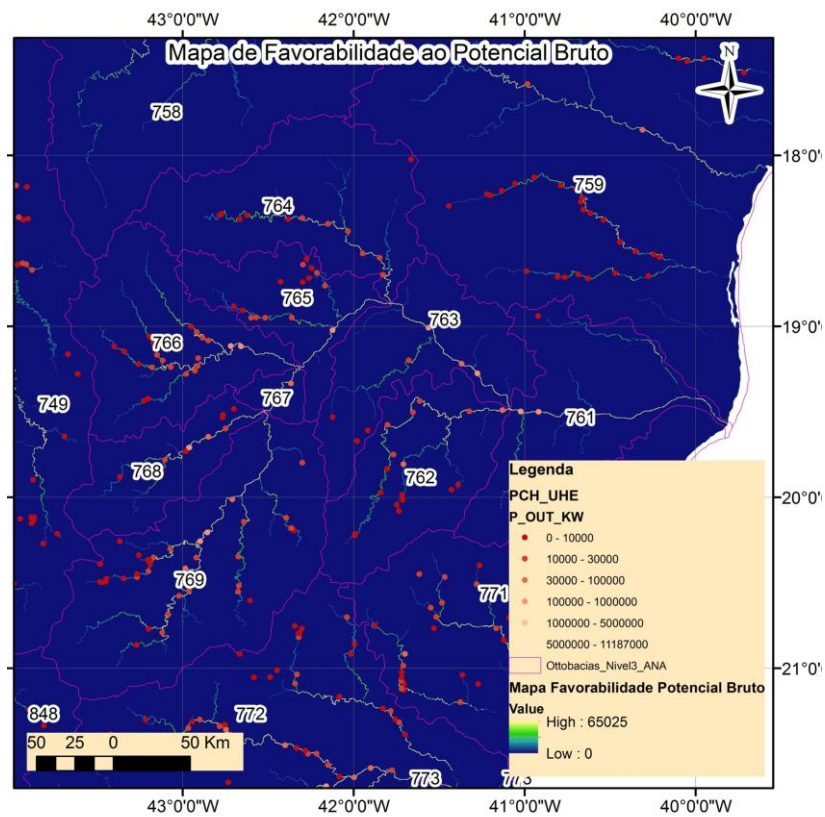


Figura 4.20 c. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto em Ottobacias (Nível 3).

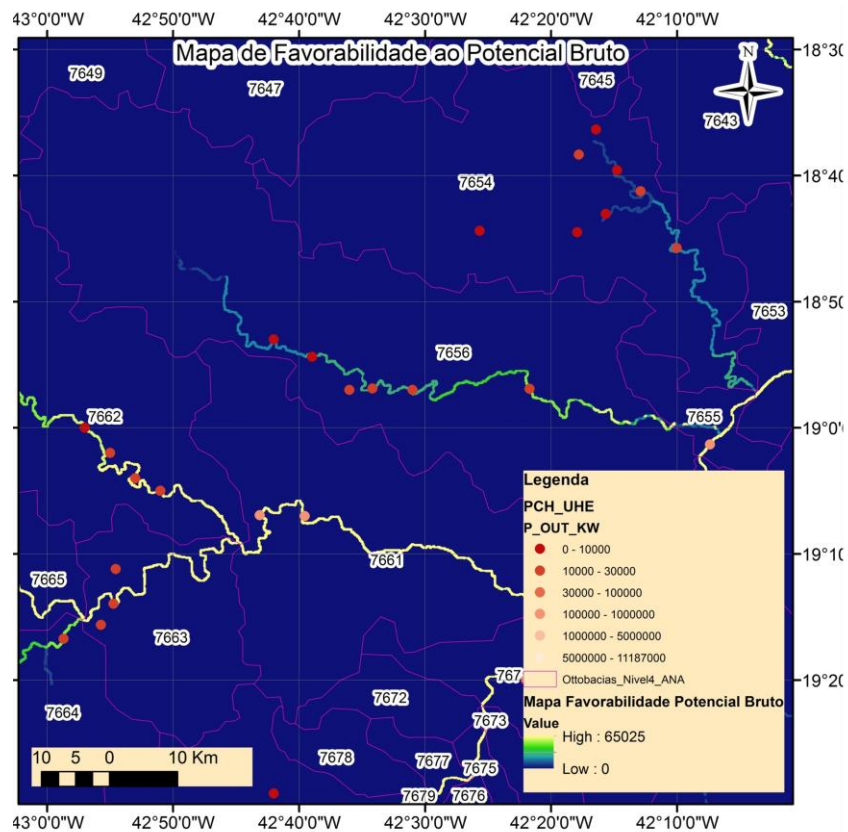


Figura 4.20 d. Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto em Ottobacias (Nível 4).

4.3.1 Avaliação Estatística do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto na bacia do rio Doce

O Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto da bacia do rio Doce foi reclassificado de formas diferentes conforme localizações dos 127 aproveitamentos existentes (UHE e PCH) em relação aos números digitais segmentados estatisticamente⁶⁵.

Tabela 4.11. Estatística descritiva dos números digitais dos potenciais hidroelétricos sobre o mapa de favorabilidade ao potencial bruto.

| Métodos de Classificação Estatística* | Número de Classes | Estatística Descritiva das Amostras | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-----|-------|---------------|------|----------|
| | | Mín | Máx | Média | Desvio Padrão | Moda | Num Moda |
| Classes Iguais | 256 | 10 | 255 | 220 | 68,524 | 255 | 92 |
| Desvio Padrão (1 δ) | 4 | 1 | 4 | 3,377 | 0,995 | 4 | 85 |
| Quantis | 10 | 4 | 10 | 9,252 | 1,115 | 10 | 72 |
| Intervalo Iguais | 10 | 1 | 10 | 2,692 | 2,309 | 1 | 53 |
| Intervalo Geométrico | 10 | 5 | 10 | 8,693 | 1,054 | 9 | 49 |
| Quebras Naturais | 10 | 1 | 10 | 4,559 | 2,292 | 3 | 24 |

* Classificação adotada em ESRI (2010) descrita em Maguire *et al.* (2005).

Verifica-se que a moda e a média, conforme os métodos de classificação estatística adotados apresentam em geral valores mais próximos aos máximos, indicando as localizações dos aproveitamentos existentes em locais de maior favorabilidade. O posicionamento em escala reduzida da localização de aproveitamentos hidroelétricos pode ser verificado nas figuras 4.21 e 4.22.

⁶⁵ Aplicações de reclassificação em análises espaciais adotada no aplicativo ArcGIS da ESRI, localizado em http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Understanding_reclassification/009z000000st000000/ Acesso em 17/9/2013.

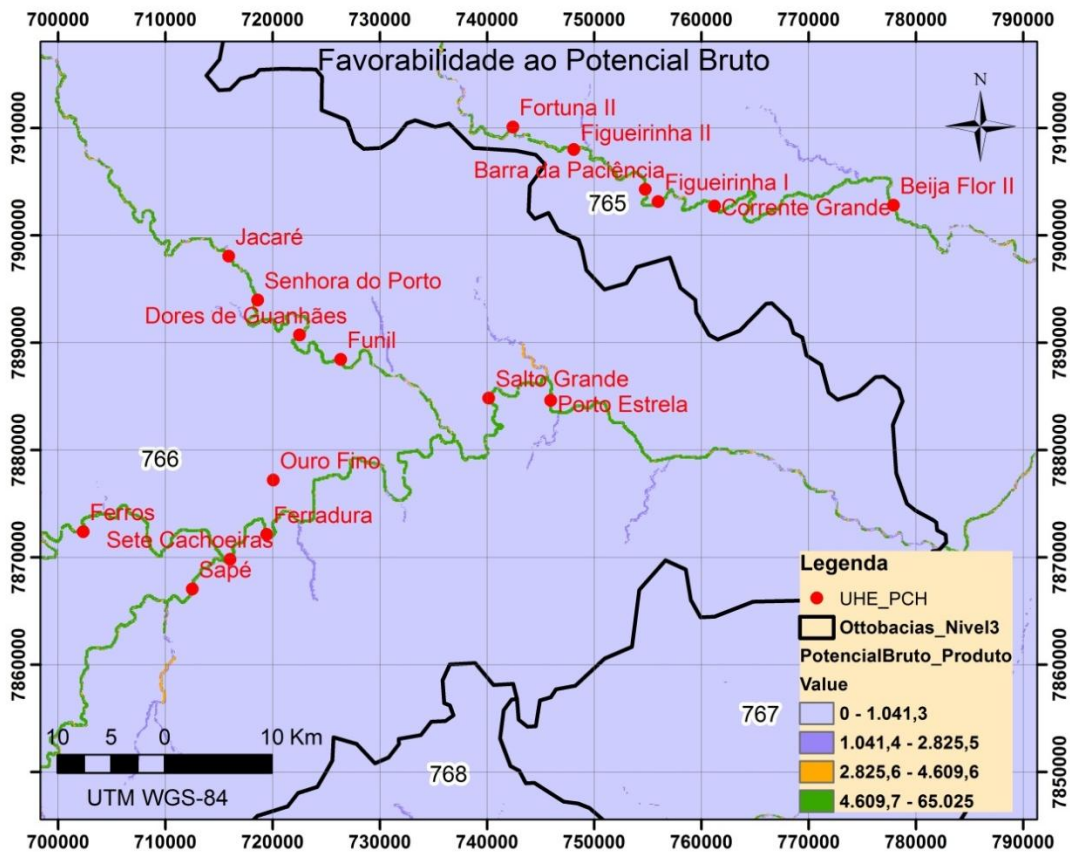


Figura 4.21. Posicionamento dos aproveitamentos hidroelétricos conforme escala de classificação segmentado por desvio padrão em 4 classes.

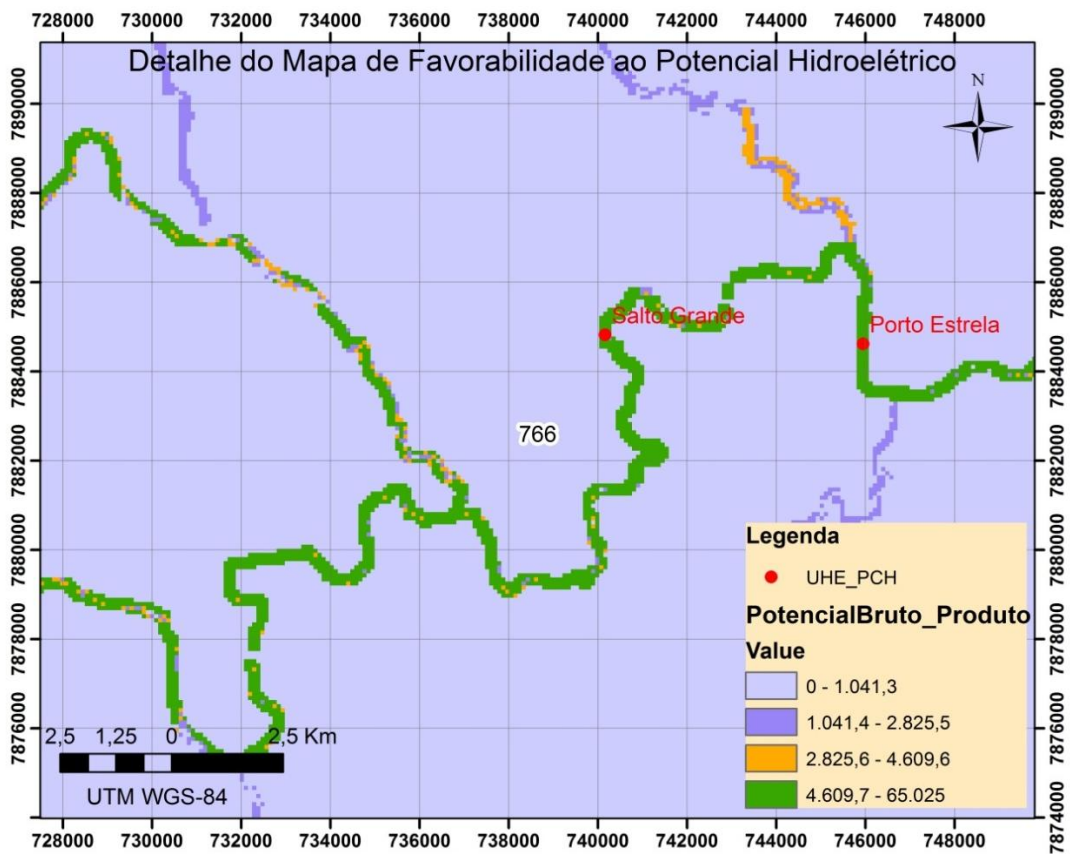


Figura 4.22. Detalhe do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Hidroelétrico na região da Usina de Salto Grande.

4.3.2 Avaliação Estatística do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto nas bacias hidrográficas do Brasil

Dos 2266 aproveitamentos hidroelétricos 329 apresentaram números digitais do mapa de favorabilidade igual a zero. Para esse grupo de aproveitamentos hidroelétricos verifica-se um ou mais dos seguintes motivos:

- A localização da casa de força (coordenadas dos pontos que indicam PCH ou UHE) encontra-se a mais 3 quilômetros de um curso d'água;
- Apresenta valor zero no mapa de vazão classificado;
- Apresenta valor zero no mapa de índice topográfico classificado.

Esses valores foram tirados das amostras para verificação da correlação entre classes de potência outorgada pela Aneel e número digital do Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto. Conforme a Tabela 4.12, utilizando-se 6 classes de potência outorgada verifica-se a redução da correlação entre número digital do mapa de favorabilidade e potência outorgada quando o número de classes inclui os aproveitamentos de maior potência, indicando que o ajuste não respeita uma linearidade.

Tabela 4.12. Estatística descritiva do número digital do mapa de favorabilidade para aproveitamentos de PCH e UHE.

| Classes (Potencia Outorgada - MW) | Número de Amostras | Estatística do Número Digital (ND) do Mapa de Favorabilidade para PCH e UHE | | | | Média da Potência Outorgada (KW) |
|-----------------------------------|--------------------|---|--------|-----------|---------------|----------------------------------|
| | | Mín. | Máx. | Média | Desvio Padrão | |
| 1 [0 - 10] | 1003 | 6 | 65025 | 1.384,54 | 4.055,38 | 4.516,64 |
| 2 (10 - 30] | 617 | 94 | 65025 | 2.639,73 | 3.892,73 | 18.804,12 |
| 3 (30 - 100] | 158 | 72 | 64260 | 6.940,63 | 8.392,62 | 59.826,09 |
| 4 (100 - 1.000] | 129 | 255 | 65025 | 19.551,48 | 17.782,35 | 290.343,77 |
| 5 (1.000 - 5.000] | 27 | 10710 | 65025 | 45.563,33 | 17.986,33 | 1.685.300,00 |
| 6 (5.000 - 11.187] | 2* | 2550 | 44880 | 23.715,00 | 21.165,00 | 9.778.500,00 |
| Soma | 1937 | 13687 | 389385 | 113564,7 | 78145,23 | 10677791 |

*Sem considerar a UHE Itaipú

Tabela 4.13. Correlações com coeficiente de Pearson para combinações de classes.

| Classes | R ² | valor P |
|---------|----------------|---------|
| 1 a 3 | 0,993 | 0,007 |
| 1 a 5 | 0,971 | 0,006 |
| 1 a 6 | 0,361 | 0,482 |

Verifica-se pela Tabela 4.12 e Tabela 4.13 que é necessário agrupar as potências outorgadas por classes para aumentar a amostra estudada. O melhor ajuste se deu por agrupamento em 13 classes, retirando da amostra a classe 6 das 3 maiores usinas brasileiras: Itaipú, Belo Monte e Tucuruí I e II, todas com potência outorgada superior a 5 GW. Os dados foram reagrupados para ajuste de correlação com as médias das potências outorgadas do SIGEL.

Consta no SIGEL que a potência outorgada da UHE Itaipú é de 6,3 Gb (seria 14 Gb caso considerasse a parte da outorga do Paraguai), as UHE Belo Monte e Tucuruí I e II estão com pontos de casa de força distantes a mais de 3 quilômetros dos canais de drenagem gerados pelo SRTM.

Tabela 4.14. Ajuste de grupos de classes para ajuste de equação Mapa de Favorabilidade x Potência Outorgada.

| Classes de Potência (KW) | Numero de Amostras** | ND Médio Mapa Favorabilidade | Média da Potência Outorgada (KW) |
|--------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| (0 – 5000] | 643 | 1260,9 | 2802 |
| (5000 – 10000] | 360 | 1605,4 | 7580 |
| (10000 – 20000] | 396 | 2195,3 | 14783 |
| (20000 – 30000] | 221 | 3436,0 | 26010 |
| (30000 – 50000] | 61 | 4331,2 | 40466 |
| (50000 – 75000] | 63 | 8589,3 | 62837 |
| (75000 – 100000] | 34 | 8567,4 | 88981 |
| (100000 – 150000] | 40 | 9438,4 | 127212 |
| (150000 – 200000] | 22 | 16207,4 | 174558 |
| (200000 – 250000] | 15 | 19818,3 | 225970 |
| (250000 – 300000] | 5 | 16422,0 | 270400 |
| (300000 – 500000] | 31 | 27259,0 | 383011 |
| (500000 – 11500000]* | 43 | 41717,2 | 747390 |

*Excluídas as UHE entre 5 GW e 11,187 GW (classe 6 da Tabela 4.12).

**Total de 1934 amostras.

A Figura 4.23 apresenta a equação de ajuste por função quadrática resulta em uma correlação de ajuste de 98,5% para 13 classes contendo 1934 aproveitamentos hidroelétricos estudados nas bacias hidrográficas brasileiras.

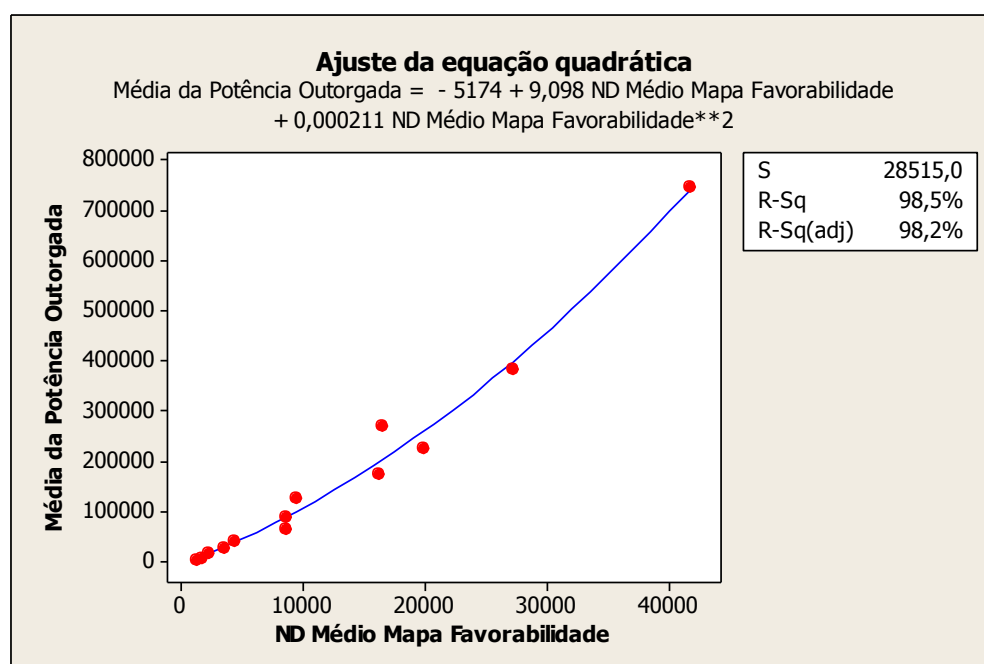


Figura 4.23. Ajuste da equação quadrática do Mapa de Favorabilidade x Média da Potência por agrupamento de classes de potência outorgada.

4.3.3 Resultados do Mapa de Favorabilidade ao potencial bruto

O Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto possibilitou na bacia do rio Doce espacialização georreferenciada do produto das áreas susceptíveis às vazões médias de longo período por quedas topográficas em trechos de rios nas ottobacias. A visualização do pixel corresponde a 90 metros e o mapa passou por um processo de estatística focal para aproximação dos maiores resultados de potenciais em vizinhança retangular de 360 x 360 metros (4 pixels). Nos estudos hidrológicos foram aplicados filtros para correção dos sumidouros (“sinks”) possibilitando um modelo hidrológicamente consistente para o processamento pelo método D8 (TARBOTON, 1997). Adotou-se escala de bacia hidrográfica (trechos de ottobacias) para a elaboração do mapa de favorabilidade ao potencial hidroelétrico, considerando-se a adequabilidade MDE/SRTM à escala de 1:100.000 (VALERIANO, 2004) para a extração de dados da fisiografia das bacias em ottobacias nível 3 e amplitudes de topografia superiores a 30 metros. Porém, as determinações das quedas d’água entre células vizinhas apresentam problemas de acurácia para a aplicação a potenciais hidroelétricos.

Quando a análise de correlação é feita individualmente por aproveitamento hidroelétrico, há elevada dispersão ente valores de potências outorgadas e número digital do mapa de favorabilidade (Tabela 4.15). Somente com agrupamento de classes por potências médias verifica-se a **alta correlação entre o Mapa de Favorabilidade ao Potencial Bruto e as classes das potências outorgadas das PCH e UHE** (Tabela 4.14). As correlações para o Brasil dos dados de vazão de longo período, mapa de favorabilidade e potência outorgada são apresentados na Tabela 4.15, para cada aproveitamento hidroelétrico (sem agrupamento por classes de potência):

Tabela 4.15. Correlações entre Potência outorgada, mapa de favorabilidade, vazão média reclassificado e índice topográfico reclassificado por aproveitamento hidroelétrico.

| Bacia do rio Doce | | | |
|---------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | DN Mapa Favorabilidade | Potência Outorgada | Índice Topográfico |
| Potência Outorgada | 84,7 0,000 | | |
| Índice Topográfico | -14,1 0,135 | -15,9 0,093 | |
| Qmlp reclassificado | 45,1 0,000 | 31,0 0,001 | 7,2 0,447 |
| Bacias brasileiras | | | |
| | DN Mapa Favorabilidade | Potência Outorgada | Índice Topográfico |
| Potência Outorgada | 66,0 0,000 | | |
| Índice Topográfico | -6,4 0,005 | -9,8 0,000 | |
| Qmlp reclassificado | 26,6 0,000 | 6,7 0,003 | 6,5 0,004 |

Correlação de Pearson
valor P para significância estatística

4.4 ANÁLISES ESPACIAIS DE RESERVATÓRIOS COM TEMAS DE INFRAESTRUTURA E DE MEIO AMBIENTE

São avaliados a seguir os efeitos das informações espaciais de infraestrutura e meio ambiente sobre as identificações de potencialidades e restrições que impactam nas tomadas de decisões em potenciais hidroelétricos. A identificação espacial das potencialidades e restrições é relevante para a atribuição de valores quantitativos ou qualitativos nas análises multicritério das alternativas dos potenciais estudados.

São avaliados a seguir os resultados alcançados pela aplicação dos seguintes processos de análises espaciais para quantificação de: (i) áreas de inundações dos reservatórios conforme a cota estimada, (ii) restrições de áreas ambientais e de infraestruturas de rodovias, ferrovias, aeroportuárias, culturas agrícolas ou áreas produtivas e (iii) volume estimado a partir do polígono do reservatório e do MDE/SRTM. As avaliações são realizadas por processos de álgebra de mapas em SIG. Os resultados são obtidos por meio de operações topológicas para aferir relações espaciais entre os temas estudados.

4.4.1 Avaliações das áreas de inundações dos reservatórios conforme a cota estimada, potencialidades e restrições

O processo de estimativa de altura do reservatório e definição de cota máxima de cheia pode ser iterativo em ambiente SIG, pois conforme a estimativa de altura do reservatório, novos cenários de engenharia de barragem devem ser considerados em função das características econômico-financeiras dos componentes da usina e interferências, geológico-geotécnicas, hidrológicas e geomorfológicas do local estudado. O processo envolve várias variáveis, porém, na etapa de prospecção a variável cota estimada do topo da barragem e a variável espacial do polígono de inundação podem fornecer outras informações relevantes ao processo decisório para avaliação e priorização de potenciais hidroelétricos.

A Figura 4.24 apresenta a simulação de modificação do eixo de barramento associada a definição da cota do topo da barragem. Esses parâmetros definem a área de inundação do reservatório para uma estimativa preliminar de impactos estudados para o reservatório Galileia (Latitude, -19,0085; Longitude, -41,5627) localizado no rio Doce, com Potência Outorgada de 238.000 KW.

O banco de dados do SIGEL não forneceu a informação de área do reservatório da usina Galileia, porém, esse valor existe para outros reservatórios. Os resultados do banco de dados do SIGEL foram comparados com as informações geradas no ambiente SIG a partir do MDE/SRTM. A informação da área de inundação em forma de polígono é mais rica de informações associadas do que somente o valor da área. Além disso, o polígono contém o valor de área como atributo do espelho d'água.

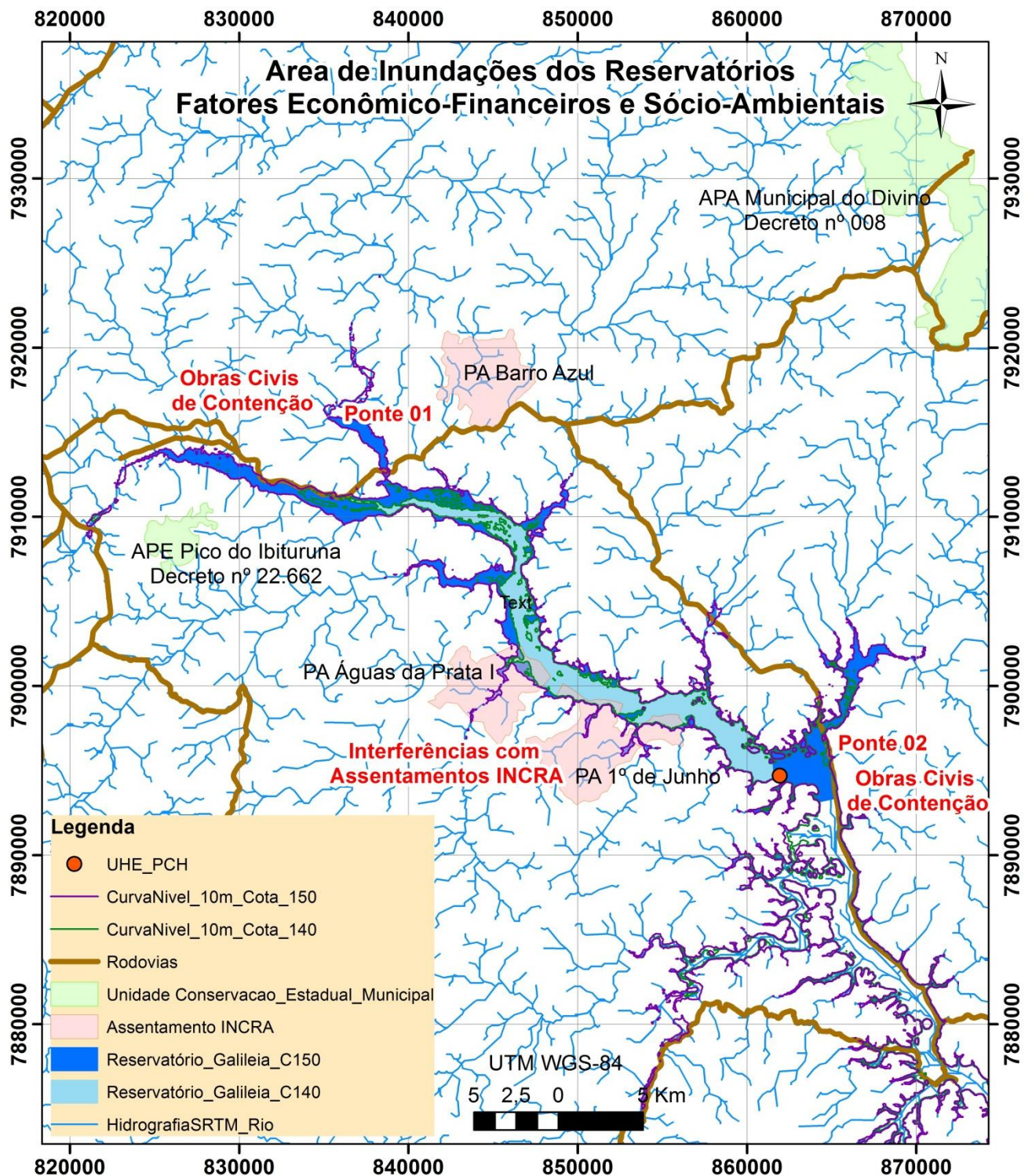


Figura 4.24. Área de inundações por simulação de reservatórios e relações com fatores econômicos, sociais e ambientais.

Em função da área de inundação pela simulação do reservatório é possível a avaliação prévia para estudos de prospecção de indícios de afogamento em barragens à montante, problema que gera ameaças à segurança de barragens, de ordem de fatores técnicos. A Figura 4.25 apresenta um exemplo de simulação de uma cota de espelho d'água para uma barragem com cota de topo na altimetria 60, com possibilidades de gerar afogamentos na barragem a montante, com cota máxima de 70 metros. A acurácia do modelo MDE/SRTM não permite a aferição de valores de cota altimétrica

com exatidão, porém, o erro estimado do MDE/SRTM permite descartar a opção do potencial, adotar outro arranjo, aprofundar os estudos de campo ou aceitar um nível de risco nessa opção de arranjo de potencial para quantificações em um modelo multicritério.

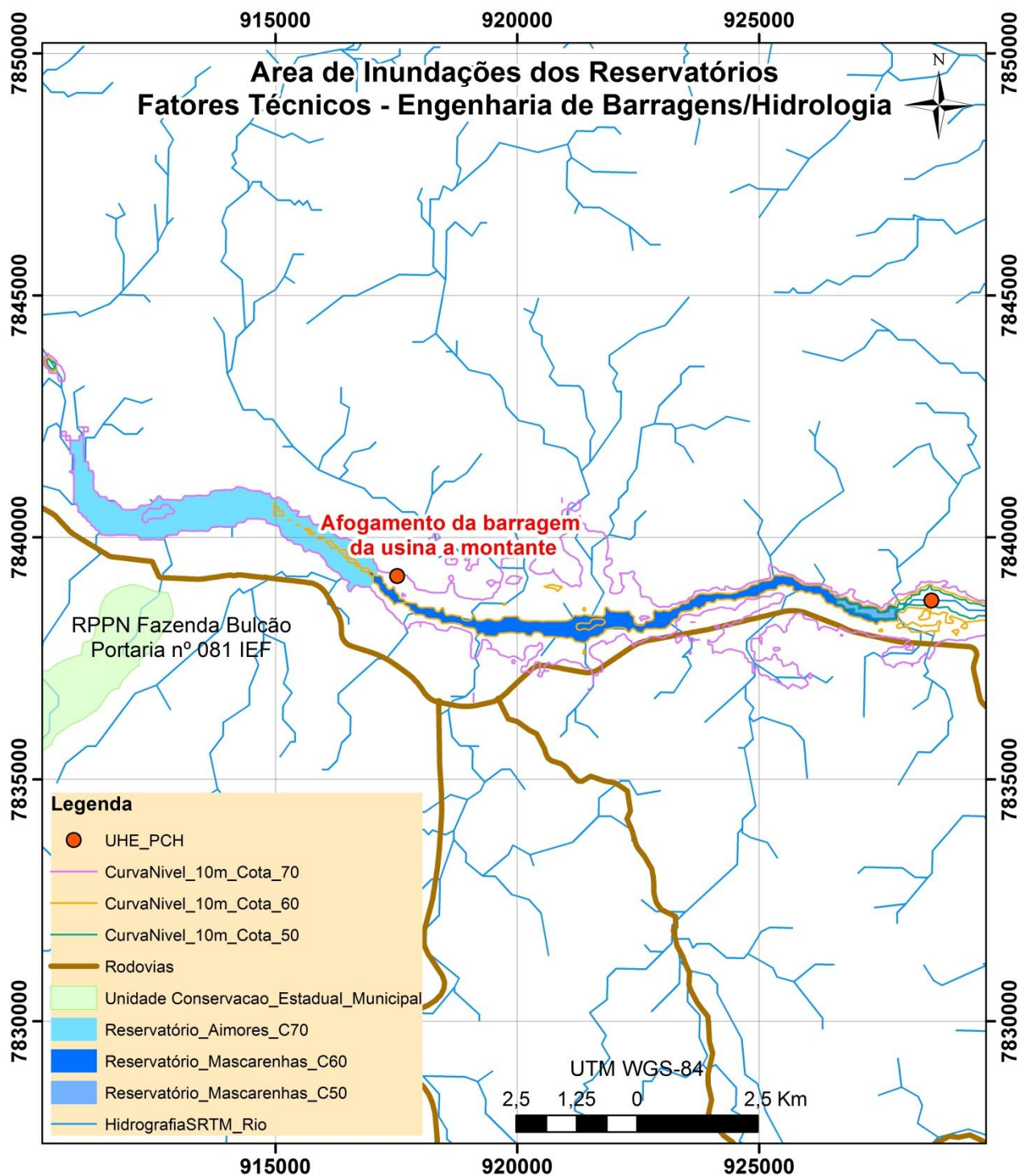


Figura 4.25. Área de inundações por simulação de reservatórios e relações com fatores técnicos.

4.4.2 Cálculo do volume de armazenamento estimado a partir do polígono do reservatório e do MDE/SRTM

O cálculo preliminar do volume de armazenamento do reservatório é determinado pelo somatório da diferença entre a cota máxima do barramento do reservatório (“Water Surface Elevation”) subtraído do MDE adotado (Figura 4.26). Esse somatório deve ser multiplicado pela área da célula do MDE para obtenção do volume estimado do reservatório, conforme apresentado por Yi *et al.* (2010).

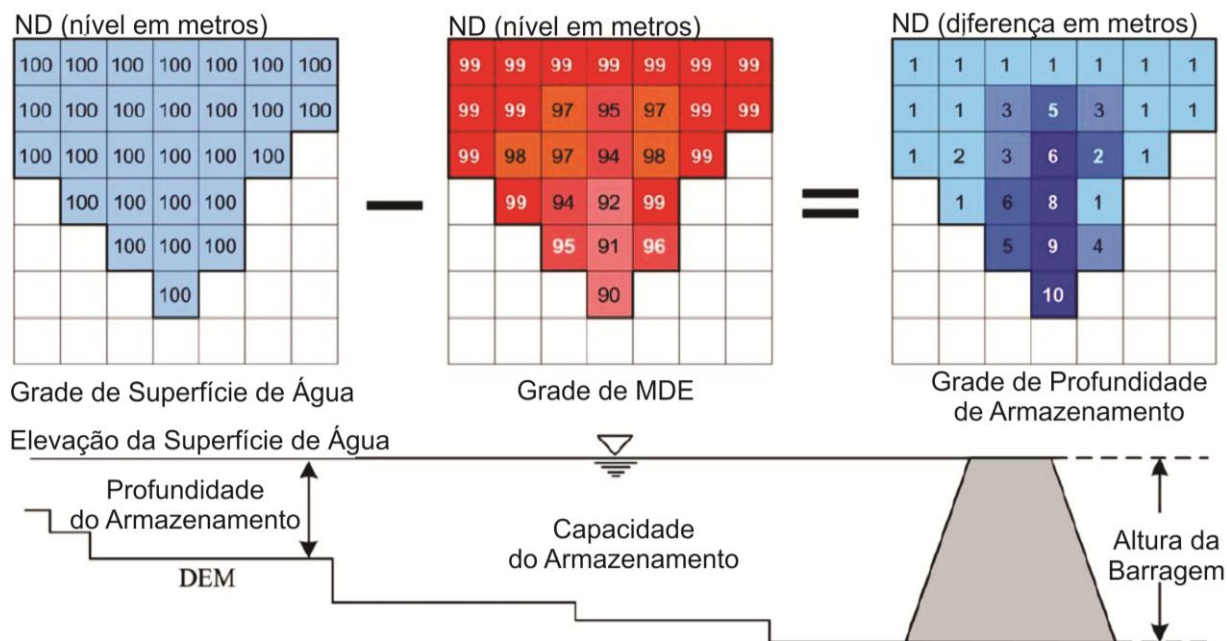


Figura 4.26. Esquema conceitual para cálculo de volume de armazenamento do reservatório. Adaptado de Yi *et al.*, 2010.

4.4.3 Quantificação de temas de infraestrutura e ocupação de áreas ambientais por meio das análises espaciais

As avaliações espaciais possibilitam a extração de informações que podem ser aplicadas em modelos de análise multicritério para cada alternativa de potencial hidroelétrico. A análise multicritério pelo método AHP possibilita a inserção de dados qualitativos e quantitativos das alternativas de potenciais avaliados. No exemplo estudado, podem ser aferidas informações sobre a elevação de custos financeiros pela escolha de um potencial devido a interferência da área de inundação em rodovias ou a necessidade de obras de contenção devido a rodovia contornar a área inundada.

Também podem ser previamente avaliados e quantificados em valores de áreas, as interferências e ameaças com projetos de assentamentos e as unidades de conservação que foram afetadas pela simulação da área de inundação do reservatório. Essa avaliação é realizada de forma imediata em SIG, orientando-se pelas curvas de nível geradas do modelo altimétrico, por meio de consultas booleanas por interseção geométrica de polígonos gerando como resultado os polígonos de interseção georreferenciados com atributos de área.

4.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROENERGÉTICO: APOIO À DECISÃO POR PRIORIZAÇÃO DOS POTENCIAIS HIDROELÉTRICOS PELO MÉTODO AHP

Os resultados das avaliações pelo método AHP somente foram possíveis após a definição dos cenários em função dos estudos de avaliação hidrológica, topográfica e verificadas pontualmente as inconsistências com as infraestruturas e áreas de interesse ambiental. Informações pré-definidas em forma de mapas podem gerar resultados rápidos quando o SIG é integrado ao modelo multicritério AHP. Outras informações (ponderações e dados das alternativas) citadas na metodologia, propostas no método AHP desta pesquisa, podem ser obtidas de forma quantitativa ou qualitativa, por consultas aos especialistas, em reuniões “brainstorm” ou aplicação de método Delphi (GORDON, 1994; WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000; TUROFF, 2002; PMI/PMBOK, 2008) e, realizações de levantamentos em campo e etapas posteriores de consolidação dos dados de fatores ambientais, sociais e técnicos (engenharia civil e geologia de engenharia).

Conforme citado no Capítulo 3 (Procedimentos Metodológicos, item 3.8.5 - Critérios Propostos na Priorização de Projetos Hidroelétricos e Figura 3.31: Critérios e subcritérios usados no estudo e dados aplicados às alternativas. Os dados e indicadores das alternativas apresentados no método AHP foram atribuídos aos seguintes subcritérios: vazão média de longo período (AA1), amplitude de altimetria média por trecho de otobacias (AA2) ou alturas médias de quedas, alturas mais próxima em relação à drenagem (AC5), sazonalidade da precipitação (AE1), vazão máxima Q_{500} (AE2), vazão mínima Q_{95} (AE3), vazão mínima $Q_{7,10}$ (AE4), proximidade a linhas de transmissão (B5).

Outros dados não foram utilizados por impossibilidade para aplicação imediata. A ausência de dados das alternativas relacionados a um determinado subcritério desconsidera a aplicação desse subcritério na análise AHP.

A Tabela 4.16 apresenta a síntese dos resultados alcançados com respeito ao objetivo “Priorização Potenciais Hidroelétricos”, selecionados por ordem de prioridade dentre as alternativas estabelecidas, após a aplicação dos pesos dos critérios e das informações das alternativas. Os valores em parênteses são os “rankings” de prioridade após a análise AHP.

Na Figura 4.28 e Figura 4.29 estão apresentados os Boxplot respectivamente do valor AHP de priorização e da posição no ranking de priorização, para cada classe de favorabilidade ao potencial bruto de energia hidroelétrica.

Tabela 4.16. Posicionamentos das Alternativas após a análise AHP.

| Alternativas e Ranking | Classes de Favorabilidade |
|---|---------------------------|
| Pot4 (12); Pot5 (37); Pot8 (31); Pot11 (14); Pot23 (35); Pot25 (32); Pot26 (39); Pot28 (40); Pot29 (41); Pot30 (45); Pot31 (46); Pot32 (47); Pot33 (26); Pot34 (42); Pot35 (43); Pot36 (38); Pot37 (44) | 76 – 10.000 |
| Pot6 (30); Pot7 (22); Pot19 (5); Pot21 (24); Pot24 (25); Pot27 (18); Pot43 (6); Pot44 (36); Pot45 (29) | 10.001 – 20.000 |
| Pot1 (27); Pot2 (21); Pot3 (4); Pot9 (4); Pot10 (2); Pot13 (28); Pot14 (1); Pot15 (23); Pot18 (17); Pot20 (34); Pot22 (19); Pot46 (33); Pot47 (13) | 20.001 – 35.000 |
| Pot12 (8); Pot16 (9); Pot17 (11); Pot38 (20); Pot39 (7); Pot40 (10); Pot41 (15); Pot42 (3) | 35.001 – 65.025 |

A Figura 4.27 apresenta os rankings distribuídos espacialmente da tabela anterior.

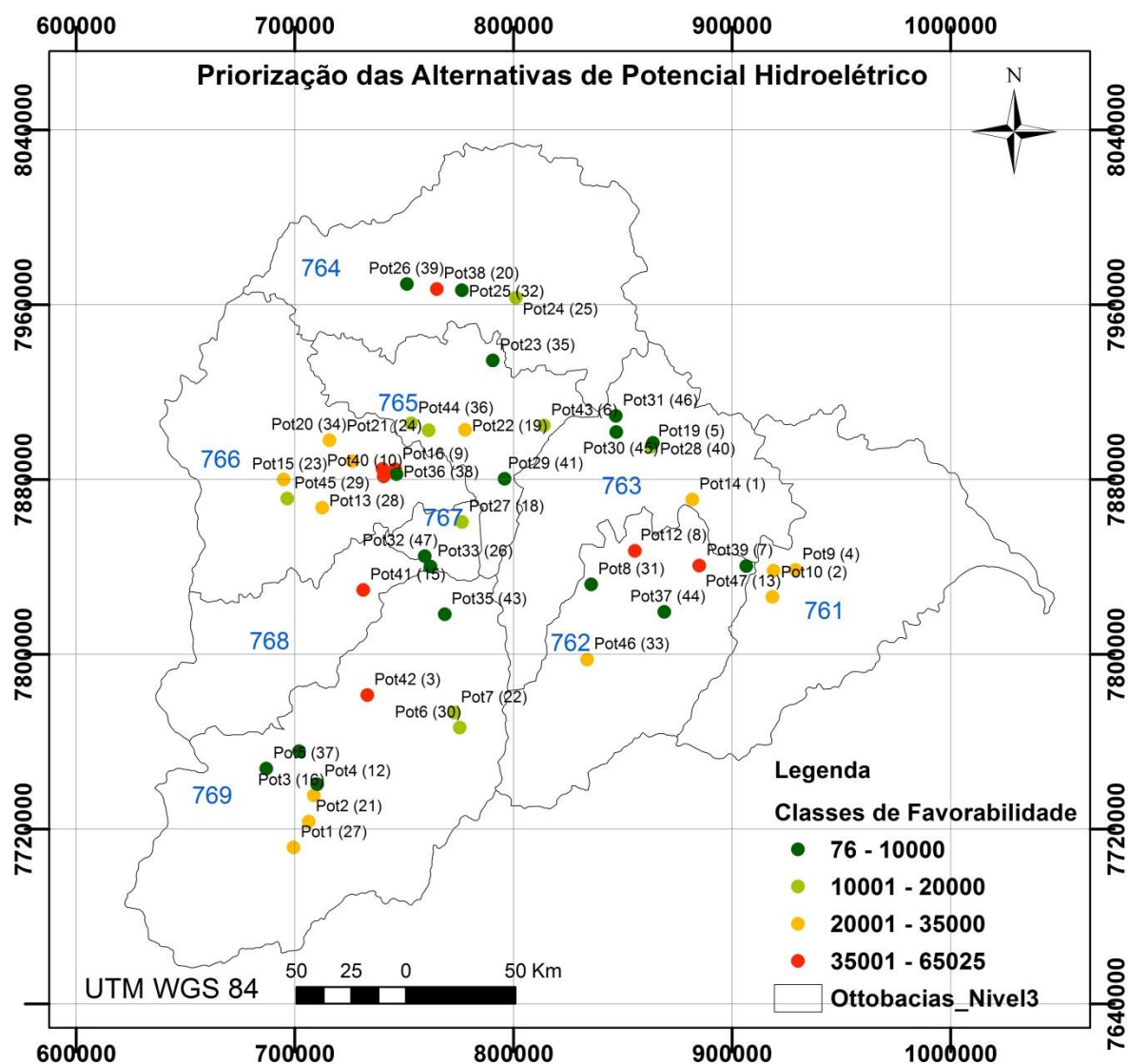


Figura 4.27. Localização georreferenciada do ranking de priorização por classes de favorabilidade ao potencial bruto hidroelétrico.

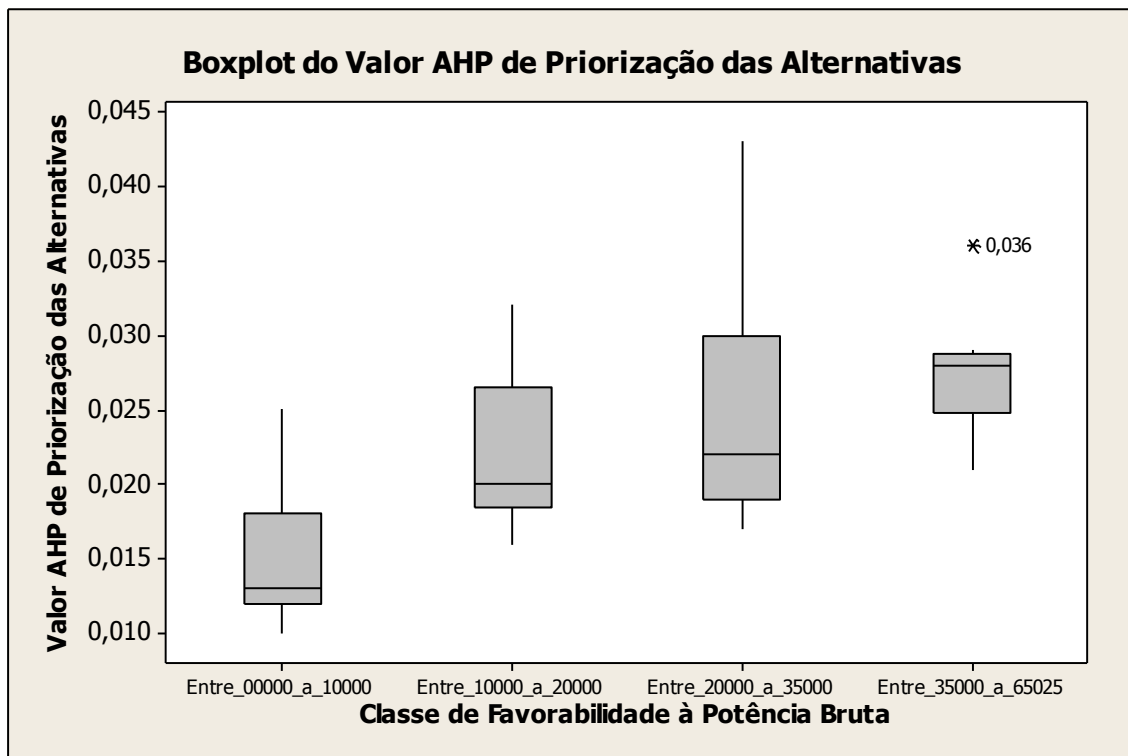


Figura 4.28. Boxplot do valor AHP de priorização por classes de favorabilidade ao potencial bruto.

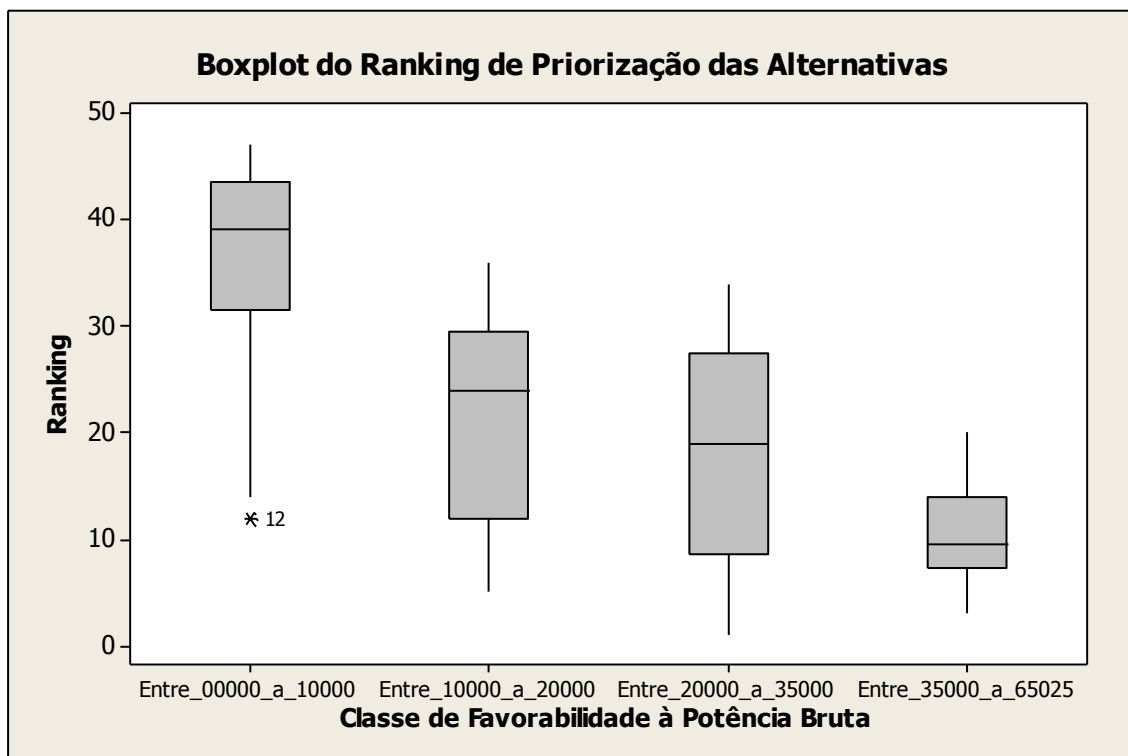


Figura 4.29. Boxplot do ranking de priorização por classes de favorabilidade ao potencial bruto.

Conforme a Figura 4.29 apenas um valor do ranking dentro da classe 0 a 10.000 de favorabilidade ao potencial hidroelétrico está fora da faixa do 1º e 3º quartil, apontando para ocorrência de um "outlier". Esse valor corresponde a um aproveitamento existente

Pot4, denominado “Bom Retiro” (Latitude -20,41667; Longitude -42,98333), localizado no rio Piranga, com Potência Outorgada de 45.000 KW.

Na localização desse potencial existem valores elevados de vazões e valores médios a reduzidos de quedas no trecho da ottobacia, e com uma distância favorável em relação a alguns potenciais mais distantes das linhas de distribuição da ONS (relacionado ao fator econômico-financeiro). Conforme os pesos iniciais adotados no método AHP, os resultados o colocam no *ranking* 12 entre a classe mais favorável ao potencial hidroelétrico (entre 35000 a 65025) diferindo do critério adotado exclusivamente pelo produto da estimativa da vazão pela estimativa da queda d’água.

Verifica-se, nesse caso, que os resultados da aplicação do método AHP indicaram a priorização das alternativas escolhidas para estudo dos maiores potenciais hidroelétricos valorizando os fatores técnicos de potencial bruto, mas considerando um dos critérios econômico-financeiros (distância às linhas de distribuição). Porém, em virtude da não consideração de outros critérios relevantes associados aos fatores ambientais e sociais, as avaliações com poucos fatores ou critérios podem não alcançar os objetivos propostos.

4.5.1 Análise de Sensibilidade

Fazendo-se uma análise de sensibilidade, por meio da valorização do peso do fator econômico-financeiro (Figura 4.33) de 9,8% para 49,5% (aproximadamente cinco vezes e decréscimo proporcional dos outros fatores), verifica-se que em face da proximidade às linhas de distribuição, os potenciais mais próximos destas passam a ocupar posição prioritária no novo “ranking”, conforme a Figura 4.30 e a Figura 4.31. Como exemplo, o potencial 4 (Pot4) que antes ocupava o *ranking* 12 decresceu para o *ranking* 28 em virtude da modificação do peso do critério de proximidade à linha de distribuição, relacionado ao fator econômico. A informação das linhas de distribuição foi apresentada em formato vetorial pela ONS e o mapa distribuído de distância à linha de distribuição foi derivado da informação vetorial apresentada pela ONS obtida no SIGEL. Os potenciais mais a montante no mesmo rio Piranga decresceram de posição pelo mesmo motivo (Figura 4.32). Nas situações de escolha de Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH), em que a importância da proximidade de linhas de transmissão é um fator relevante pelo aspecto econômico, o método avalia uma simulação baseada em critérios objetivos.

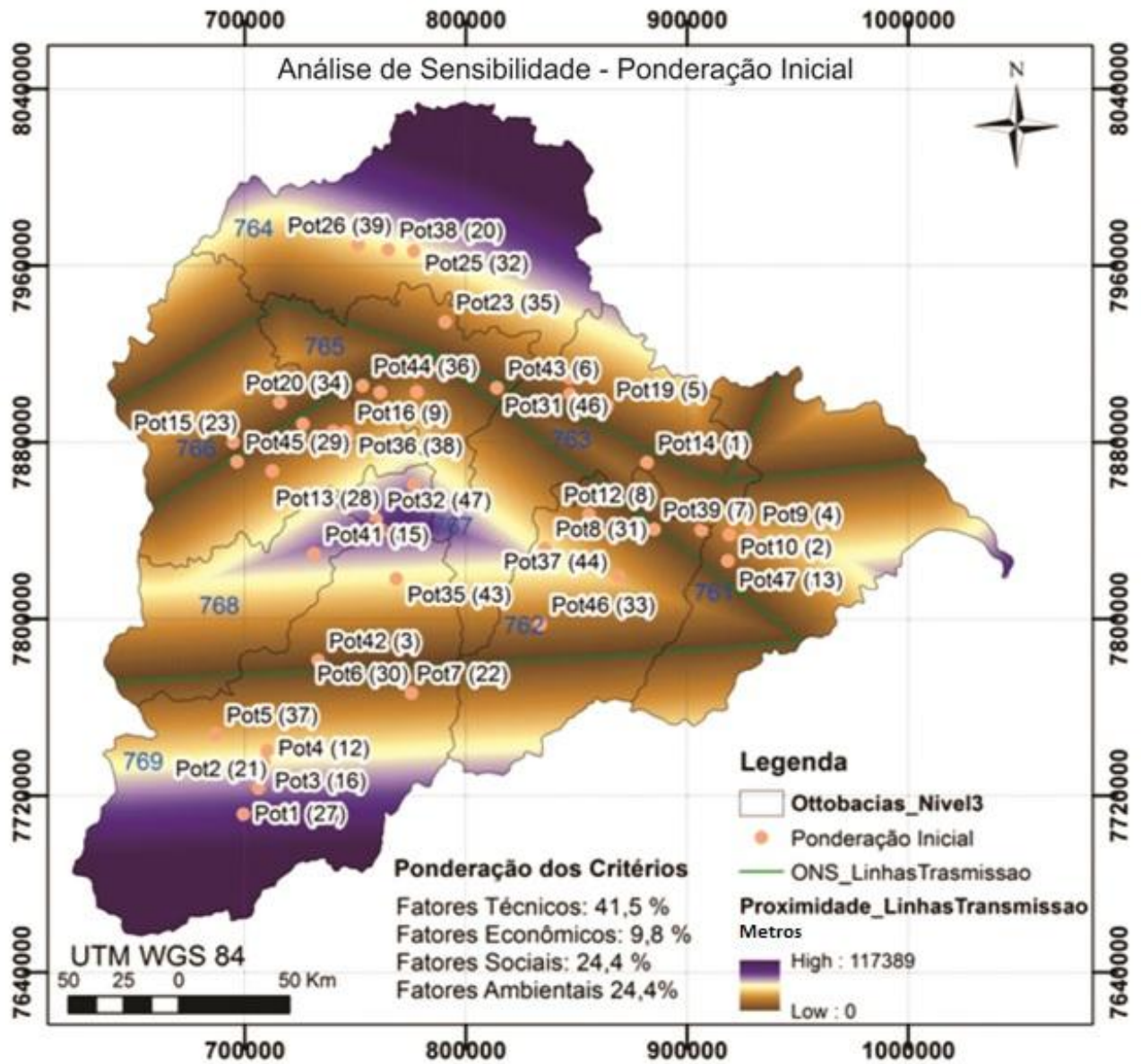


Figura 4.30. Análise de Sensibilidade pela variação de pesos dos critérios: situação inicial de ponderação dos critérios.

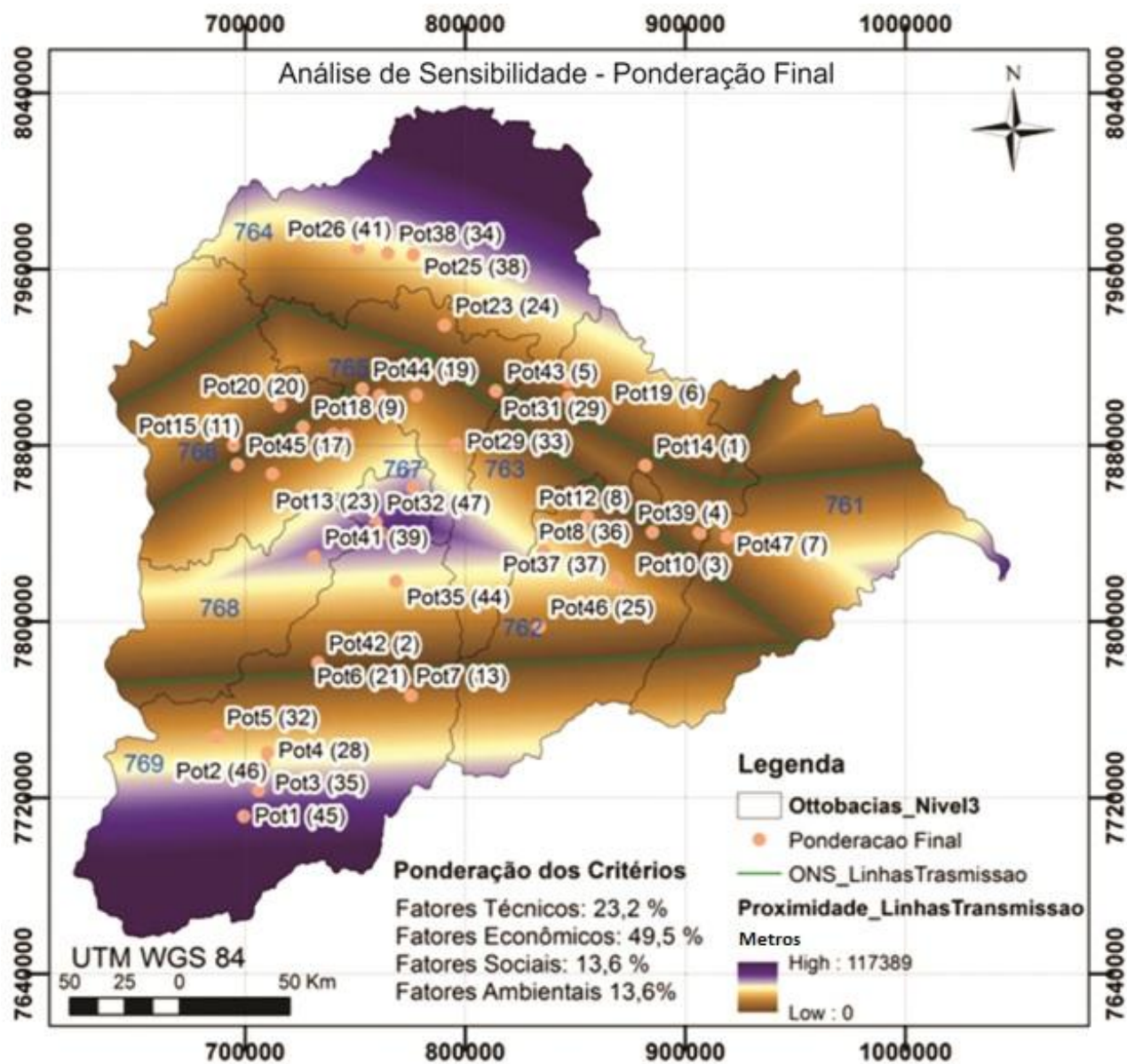


Figura 4.31. Análise de Sensibilidade pela variação de pesos dos critérios: situação final de ponderação dos critérios pela valorização do fator econômico-financeiro.

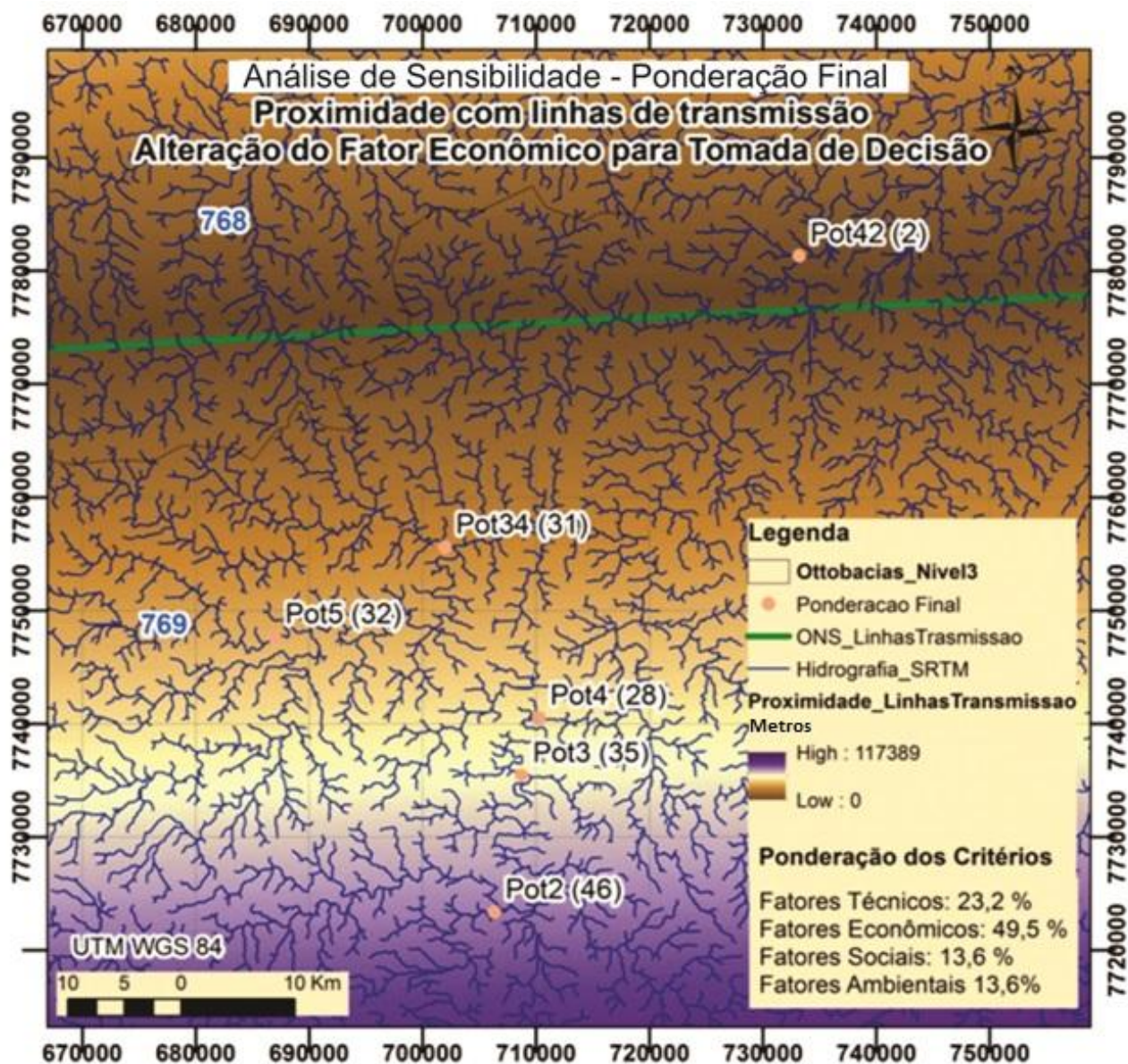


Figura 4.32. Detalhe da alteração do *ranking* de prioridade de escolhas de potencial hidroelétrico pela priorização do fator econômico-financeiro.

Na Figura 4.33 os pesos dos fatores técnicos, econômicos e financeiros, sociais e ambientais variam dinamicamente desde a proposta inicial até a priorização por fatores econômicos financeiros, demonstrando a variabilidade dos percentuais para o objetivo modelado, conforme a representatividade dos potenciais vizinhos Pot2, Pot3, Pot4 e Pot5 sobre todos os percentuais das 47 alternativas avaliadas.

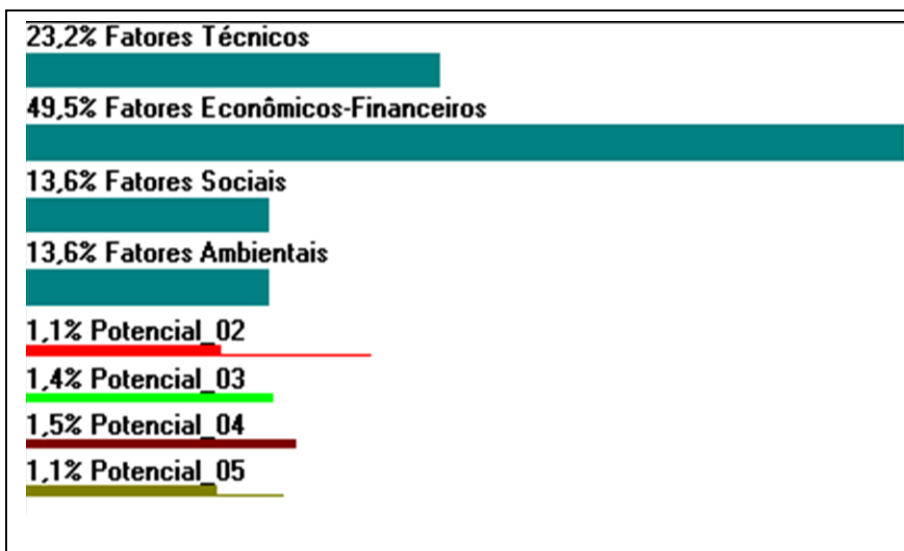
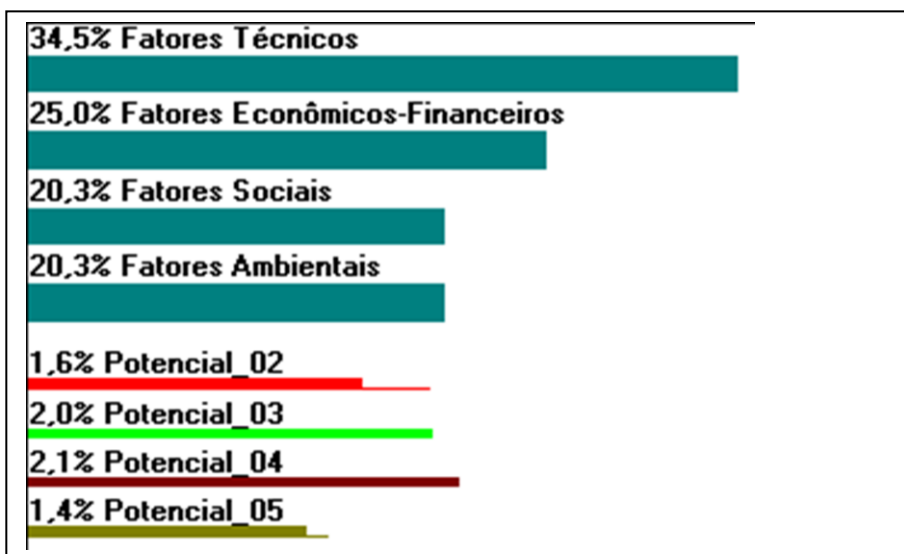


Figura 4.33. Sensibilidade dinâmica para o primeiro grupo de critérios.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 ABORDAGEM SISTÊMICA DA METODOLOGIA

Por meio de abordagem sistêmica foi possível conjugar conceitos de diversas ciências para a avaliação de potenciais hidroelétricos. O benefício do estudo de prospecção de potenciais hidroelétricos não se restringe às fases de estudos preliminares – remanescente e individualizado - e inventário. Os resultados sugerem que as dimensões e facetas das diversas ciências (hidrologia, geologia, geotecnia, engenharia de barragens, geologia de engenharia, ecologia, geoprocessamento, gerenciamento de projetos, pesquisa operacional) podem ser empregadas de forma integrada para aperfeiçoar em fases posteriores o estudo e a compreensão dos fenômenos que levam a escolhas dirigidas por critérios de preferência e aceitação dos intervenientes.

A troca de dados entre o sistema SIG (aplicativo ArcGIS) e Sistema de Análise Multicritério (aplicativo ExpertChoice) facilitou a integração de informações, o controle e a coerência para a tomada de decisão da priorização de potenciais hidroelétricos. Foram realizadas abstrações para simplificação de modelos ambientais complexos e organizadas informações de cunho geomorfológico, hidrológico, socioeconômico e ambiental em planos de informações, conforme melhores práticas mundiais. Os sistemas possibilitaram a transformação de dados e informações de forma a ajustarem-se aos modelos para apoio à decisão.

A flexibilidade dos modelos para apoio à decisão em ambientes SIG e AHP possibilita que os interessados no objetivo para avaliação de potenciais possam retroalimentar e verificar de forma clara as favorabilidades e restrições. O processo decisório possibilita tratamento de informações de cunho qualitativo ou quantitativo de modo lógico e racional, através de uma abordagem quantitativa ponderada. Essa abordagem possibilita que a ênfase na decisão da escolha por favorabilidades de potenciais, quantificadas na fase de prospecção, anteceda ações de investimentos ou outras decisões do poder público.

Os resultados são apresentados por meio de mapas e tabelas estruturadas. Os modelos de dados permitiram maior acurácia das informações preliminares obtidas por processos bem definidos. Foram aplicados mapas matriciais com informações espaciais georreferenciadas e matrizes com dados das alternativas dos potenciais hidroelétricos. As imagens matriciais são originadas dos dados públicos ou dos dados derivados (matriciais ou vetoriais), gerados por processos de análises espaciais pela aplicação de geotecnologias.

Os resultados apresentados não procuraram solucionar problema de gestão do estudo de potencial em bacia hidrográfica, e sim, formular soluções metodológicas e conceituais para aplicações na realidade empírica para identificar potencialidades dos estudos hidroelétricos necessárias ao aprofundamento das avaliações integradas. Os resultados das pesquisas sugerem que as fases de estudos de potenciais hidroelétricos, desde as etapas preliminares, devem ser estudadas sob um conjunto de

fatores globais, e somente podem ser compreendidas quando avaliadas todas as interdependências de suas partes. A progressividade do estudo do potencial, remetendo a ideia de ciclo de vida de projeto, indica que os fatores propostos e as características estudadas desde a fase de prospecção, podem ser quantificados preliminarmente a partir de bases de dados dinâmicos, e melhor detalhados nas fases posteriores, à medida que é maior o entendimento do potencial ou dos arranjos dos potenciais. Entre os benefícios está a redução do nível de informação entre a fase preliminar e a fase de inventário de potenciais hidroelétrico.

5.2 APLICABILIDADE DA METODOLOGIA PARA ÁREAS GEOGRÁFICAS NO BRASIL

Muitos estudos acadêmicos têm sido ultimamente realizados na bacia do rio Doce. Nessa bacia hidrográfica há grande quantidade de informações disponíveis. Aplicações de tecnologias permitem a disponibilidade de dados para estudos multidisciplinares e a natureza proporcionou, na bacia do rio Doce, ambientes favoráveis à exploração de potenciais de energia pelo homem. Essa bacia guarda uma história de acontecimentos ainda sujeitos a acontecer em outras bacias brasileiras.

Atualmente a bacia do rio Doce é monitorada e controlada com suporte de informações ambientais, hidrológicas e meteorológicas. Existem 22 plataformas de coletas de dados (PCDs) meteorológicas automáticas e telemétricas, além de informações do satélite National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA/EUA) para monitoramento do tempo e clima com transmissão de dados de satélite, telefonia e internet. Além disso, instituições públicas (INMET, IGAM, CEMIG, COPASA, ANA, CPTEC/INPE, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) participam de programas governamentais integrados com objetivos de efetuar o monitoramento da disponibilidade hídrica na região efetuando aquisição e difusão de dados. Diferente de outras bacias mais distantes dos centros urbanos, na bacia do rio Doce há muitos registros de séries hidrológicas históricas superiores a 30 anos.

Sob o fator econômico-social a ocupação antrópica da bacia hidrográfica do rio Doce se confunde com a história do Brasil. Apesar de descoberta da bacia do rio Doce em 1501 pelos navegadores portugueses, a bacia hidrográfica teve a sua ocupação iniciada, já em fins do século XVII, nas cabeceiras de seus rios. Cidades que hoje são históricas foram a porta de entrada para a ocupação da bacia. No passado chegou-se a proibir a navegação fluvial no rio Doce no intuito de evitar os “descaminhos do ouro”. A efetiva ocupação da região somente se deu a partir da construção da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), iniciada em 1903 em Vitória, Estado do Espírito Santo. Na década de 30 ocorreu a ocupação para expansão pecuária e a forte demanda por energia com fontes no carvão para as siderurgias e na madeira, como produto de exportação para a Europa pós-guerra, Estados Unidos e Japão. Ocorreu nas décadas de 30 e 40, importante processo de devastação.

Na década de 50 foi inaugurada a rodovia Rio-Bahia fazendo corredor migratório para populações no Norte e Nordeste e inchamento de cidades. Foi inaugurada a

Companhia de Aços Especiais Itabira – ACESITA e dez anos mais tarde, poucos quilômetros a jusante do rio Piracicaba, surgiu Usina Intendente Câmara – USIMINAS. Foram instaladas siderúrgicas em cidades o que propiciou o surgimento do Aglomerado Urbano do Vale do Aço. A necessidade por geração de energia de alto desempenho estava consolidada e nas décadas seguintes surgiu a exploração de potenciais hidroelétricos na bacia do rio Doce.

Nas décadas de 50, 60 e 70 usinas hidroelétricas foram construídas sem as ferramentas, tecnologias e os conhecimentos que a sociedade dispõe hoje. Tais empreendimentos exigiram das gerações de “barrageiros”, projetos e construções de barragens, cálculos complexos, medições e observações, estudos das propriedades e comportamento dos materiais de construção e das fundações. Esse conhecimento colocou o país em nível privilegiado em construção de hidroelétricas. As lições aprendidas e os conhecimentos adquiridos devem continuar marcando a importância para o desenvolvimento da sociedade diante das complexidades atuais e novos desafios da engenharia. Há muito que se explorar em matrizes energéticas sustentáveis. A consolidação e operação de um sistema interligado nacional de energia elétrica têm agora que ser avaliados sob novos conceitos, voltados aos parâmetros da sustentabilidade.

Na história recente, as políticas nacionais de recursos hídricos, apresentadas no final da década de 90 estabeleceram fundamentos e instrumentos para a gestão integrada. Entre os fundamentos está o de proporcionar o uso múltiplo das águas. Entre os instrumentos destacam-se os sistemas de informações. O Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos (SNIRH) tem o propósito de fornecer subsídios para a formulação dos Planos de Recursos Hídricos, além de reunir, divulgar e atualizar permanentemente dados sobre qualidade, quantidade, disponibilidade e demanda pelos recursos hídricos do país. Sugere-se nesse estudo que as informações são apenas parte dos instrumentos de gestão, pois há necessidade de aperfeiçoamentos de processos bem definidos, flexíveis de operação e simulação, variando conforme a disponibilidade e qualidade da informação, para aperfeiçoar o entendimento sobre os problemas analisados em todas as fases de estudo, no que se refere ao uso da água para geração de energia elétrica e interface com outros usos.

O desenvolvimento das sociedades e a necessidade por energia agregam os fatores de infraestrutura, socioeconômicos e ambientais. No final do século passado, as decisões em políticas energéticas tiveram cunho eminentemente desenvolvimentista. Nos últimos anos, o Brasil e o mundo passaram por mudanças de ordem cultural, destacando-se o respeito aos direitos humanos e ao meio ambiente. As condições políticas e econômicas adversas exigem cada vez mais a compreensão das diversas multidisciplinaridades em decisões para planejamento energético.

Esse aspecto do desenvolvimento de regiões próximas aos grandes centros urbanos do Brasil, como é o caso da bacia do rio Doce, ocorreu e está ocorrendo em outras regiões do Brasil, porém, em situações e momentos diferentes. Atualmente, decisões em políticas públicas de alto impacto muitas vezes são irreversíveis para o meio

ambiente e o bem estar social. Há necessidade de maior conhecimento para tomada de decisão devido a complexidade dos novos fatores considerados.

Em muitas áreas do território brasileiro ocupações antrópicas estão ocorrendo antes dos planejamentos que aplicam tecnologias robustas por tratamento de dados e informações. As mudanças de hoje tendem a ocorrer com maior rapidez, algumas vezes são mais profundas e marcam por horizontes de tempo maiores que a capacidade de recuperação da natureza. O uso do solo ou ocupações não planejadas, devido desmatamento, exploração mineral e agropecuária, construção de obras de transportes e reservatórios, podem gerar problemas de várias ordens, e inibir a exploração sustentável do meio ambiente e o bem estar social. São necessárias, portanto, medidas de prevenção e ênfase na qualidade da decisão anterior a ação.

As aplicações robustas de geotecnologias associadas aos sistemas de suporte a decisão podem ser consideradas como um aperfeiçoamento dos instrumentos para a formulação e implementação de políticas setoriais. As bases de dados multidisciplinares na área geográfica da bacia do rio Doce contêm cenários de um exemplo de uma história do desenvolvimento de regiões brasileiras. O estudo possibilitou organizar algumas informações espaciais da bacia do rio Doce e abstrair por meio de modelos a compreensão de fatores sociais, ambientais e socioeconômicos necessários à avaliação de potenciais hidroelétricos em fase de prospecção.

5.3 APLICABILIDADE DA METODOLOGIA PARA ESCALAS ESPACIAIS

O método potencializa a aplicabilidade para múltiplas escalas espaciais que podem iniciar de bases de dados com abrangência do território nacional, alcançar escalas de bacias hidrográficas ou escalas locais quando levantamentos e cadastros in loco puderem ser realizados para uma quantidade limitada de alternativas escolhidas. É importante que as mesmas qualidades de informações (ou mesmas escalas de mapas) sejam adotadas para os objetivos e hierarquias de critérios das avaliações. A metodologia possibilita escalabilidade para suportar crescimento das bases de dados e elevação da acurácia.

5.4 INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS E TÉCNICAS DE SIG E DO SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO

O modelo para implantação da base de dados no SIG e de análise multicritério é aberto para ampliação de informações. Existem outros mapas que podem ser gerados por especialistas com a finalidade de compor uma base de dados de mapas derivados de interesse da avaliação de potenciais hidroelétricos com abrangência nacional. Alguns já estão disponíveis na administração pública (ex. mapa de produção de sedimento, mapa de estrutural e estratigráfico, mapa de pedologia/hidrogeologia, uso e ocupação do solo) e outros podem ser elaborados a partir de informações primárias existentes (ex. mapa de número de curva de escoamento – “curve number” SCS/CN, mapa de infiltração e propagação no ciclo hidrológico e simulação de reservatórios). Essas informações seriam úteis para ampliar o conhecimento de variáveis ou aplicá-las em modelos que podem operar em ambiente SIG (Arc-Runoff, ZHAN E HUANG, 2004; CN

Grid HEC-GeoHMS, FLEMING E DOAN, 2009; HEC-HMS/HEC-RAS, CUNDERLIK e SIMONOVIC, 2004) com a finalidade de gerar mapas derivados a baixo custo e de uso intensivo. Os resultados gerariam indicadores relevantes aos estudos de potenciais hidroelétricos na fase de prospecção.

O ambiente SIG possibilitou operação de extensas bases de dados em abrangência nacional para diversos planos de informações. Essa massa de informações no ambiente SIG foi possível ser integrada com o modelo de suporte a decisão por meio das medidas qualitativas e quantitativas, obtidas do SIG e assistidas pelo operador dos modelos SIG e AHP desacoplados.

A forma de gerar e extrair a informação pôde ser mapeada em processos bem definidos para alimentar a matriz de alternativas no sistema de suporte a decisão. Os processos AHP aplicados, por serem conhecidos e possuírem códigos abertos, poderiam ser desenvolvidos em ambiente SIG de forma que a integração dos métodos possa ser realizada acoplada em um mesmo aplicativo. Com o conhecimento das características do projeto nas fases seguintes de inventário, metodologias de elaboração dos planos de informações e do processo de decisão podem ser mantidas.

Os métodos de tomada de decisão mais utilizados conforme as melhores práticas mundiais são os orientados por “multiobjetivos” e “multiatributos”. Ambos possuem vantagens e desvantagens e sua aplicabilidade é função da qualidade dos indicadores disponíveis mais representativos. No método AHP esses indicadores puderam ser traduzidos em sub-critérios apresentados em forma de mapas gerados no ambiente SIG.

O método par a par (*pairwise*) de quantificar os pesos parece ser uma solução adequada quando há participação ativa dos “*stakeholders*” nas várias fases nos processos decisórios. A escolha baseada nas potencialidades e restrições dos múltiplos atributos possibilita flexibilidade nas escolhas e parece ser mais relevante, para o caso da aceitação dos interessados positivamente e negativamente no projeto, do que a intenção de maximizar indicadores de objetivos. Nesse caso, diante da aplicação de indicadores ainda não bem definidos, insuficientemente compreendidos ou aceitos pelos “*stakeholders*”, poderia haver dificuldade na clareza e transparência nos fundamentos das decisões.

Porém, com o amadurecimento da formulação dos indicadores para o tipo de estudo específico e do processo decisório aplicado, a metodologia de tomada de decisão por múltiplos objetivos parece ser uma técnica potencial para aplicações em avaliações de sustentabilidade de projetos de infraestrutura que envolva questões ambientais e socioeconômicas.

5.5 REGIONALIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES – VAZÕES E ELEVAÇÃO DO TERRENO

A disponibilização de informações em bases de dados matriciais de vazões e topografia facilita a integração para as análises por múltiplos critérios. Por meio de informações matriciais nos modelos georreferenciados originais e derivados estas informações podem ser atributos das informações dos potenciais hidroelétricos. Para isso foram estruturadas as informações relevantes para a fase de prospecção. Para a regionalização das informações em bases matriciais foram aplicadas estatísticas espaciais e análises espaciais. Porém, cada método aplicado deve estar ajustado à qualidade da informação disponível.

As bases de informações hidrológicas existentes no Brasil não estão suficientemente representadas para aplicação em estudos de potenciais hidroelétricos. A variável de área de drenagem a montante não representa, na maioria dos casos, o regime fluvial necessário ao estudo das vazões para estimativa do potencial hidroelétrico. As estimativas das vazões médias, máximas e mínimas, além de melhoramentos metodológicos devem ser disponibilizadas em bases georreferenciadas sem a necessidade pontual de recorrer aos especialistas nessa etapa preliminar.

São necessários ajustes para regionalização das vazões médias, mínimas e máximas em bases de dados matriciais para imediata extração das informações com finalidades das avaliações preliminares de potenciais hidroelétricos. O método GWR utiliza bases de informações de vazões georreferenciadas obtidas por métodos hidrológicos de regionalização e registros de estações hidrométricas. Sua vantagem metodológica está mais em aumentar de forma semi-automatizada a densidade de informações hidrológicas do que realizar estimativas por modelos hidrológicos. O método também permite a atualização de extensas bases dinâmicas temporais de dados hidrológicos de vazões pertencentes à administração pública permitindo imediato acesso às informações de interesse da estimativa de potenciais hidroelétricos.

Sob o mesmo aspecto do tratamento da informação de vazões, os métodos aplicados de estatística focal e zonal para geração do índice topográfico, aplicam-se à representação de informações topográficas diante da indisponibilidade de um modelo digital de elevação ou de modelo digital de terreno suficientemente acurado (precisão e exatidão) para identificar quedas d'água e declividades em trechos específicos.

5.6 – RECOMENDAÇÕES

Entre as prioridades dos serviços ofertados pelas instituições que tratam de informações de dados públicos de políticas setoriais (ex. energia elétrica, transportes, meio ambiente) deveria estar o gerenciamento de uma base de dados da informação espacial, inclusive o planejamento, a garantia e o controle da qualidade da informação. O gerenciamento de dados e informações deveria ser assegurado por um arcabouço legal, para estabelecer meios de possibilitar a segurança, confiabilidade, facilidade de uso e acessibilidade das informações setoriais. Não há sentido em gerenciar potenciais hidroelétricos sem o conhecimento adequado das informações relevantes em cada fase da gestão e sem a participação dos “stakeholders”.

Nessa pesquisa a informação espacial e os atributos obtidos de dados primários disponíveis, possibilitaram a geração de mapas derivados factíveis de gerar informação mais adequada e acurada para a tomada de decisão na avaliação e priorização de potenciais hidroelétricos. Porém, verificaram-se falhas diversas em aspectos qualitativos dos dados e dificuldade de acesso a algumas informações disponíveis em instituições públicas. Outro aspecto relevante é a ausência dos metadados, da completude das bases de dados, das metodologias e dos processos mais detalhados para a geração dos dados disponíveis.

Em alguns casos, informações que poderiam estar disponíveis diretamente para leitura em aplicativos SIG, somente podem ser acessadas em formato PDF ou outro não georreferenciado. Tais práticas, privilegiam a consulta mas dificultam a obtenção de dados e informações para análises ou tratamento para outras aplicações, inclusive a utilização dessas informações nos ambientes especializados.

Estudos posteriores podem realizar aplicações em krigagem topológica (topkriging) para comparar os resultados obtidos pelo método GWR no sentido de definir metodologia para melhor representar dados espacializados em modelos matriciais de vazões médias, mínimas e máximas. Os estudos de regionalização para avaliação de potenciais hidroelétricos devem objetivar a geração rápida de modelos dinâmicos matriciais de dados de vazões com finalidades aos estudos de potenciais hidroelétricos. Os geoindicadores ambientais para utilização em projetos hidroelétricos são instrumentos de gestão que devem ser refinados dentro de conceitos de gerenciamento de projetos (ciclo de vida, mapeamento de processos, áreas de conhecimentos em fases do ciclo do gerenciamento), de forma a permitirem aplicações diretas em sistemas de apoio à decisão AHP.

Em breve novas bases mundiais de modelos de elevação estarão disponíveis além do MDE/SRTM. Sugere-se aplicações de geotecnologias modernas para geração de modelos de dados de altimetria superiores à acurácia do MDE/SRTM a partir de processos de baixo custo. Verifica-se a tendência por pesquisas em extração de dados de altimetria das imagens de sensores orbitais recentes, LIDAR, aerofotografias ou sensores de baixo custo em aeronaves não tripuladas para levantamentos em áreas de bacias hidrográficas. Existem diversas bases de informações de altimetria geradas para finalidades distintas, seja em projetos hidroelétricos ou não, porém, com restrições de

acessibilidade à informação. Para reduzir custos e agilizar esforços é necessária a organização das bases de dados públicos de altimetria com metadados, em uma base única de vetores e imagens matriciais para acesso público.

Estudos complementares devem ser realizados no sentido de melhorar a capacidade de geração de melhores indicadores econômico-financeiros e sociais, a baixo custo e elevado benefício, para apoiar melhores decisões na fase de prospecção de potenciais hidroelétricos. É relevante uma coleção de dados econômicos e financeiros, em séries históricas e estruturados analiticamente, sobre os aproveitamentos construídos. Isso possibilitaria elevar a inteligência para tomadas de decisões econômico-financeiras e interfaces com os outros fatores.

Os critérios, sub critérios e pesos adotados nessa pesquisa foram apresentados como propostas iniciais orientados por práticas mundiais. Os subcritérios e os pesos dos critérios adotados para projetos hidroelétricos no Brasil, provavelmente serão diferentes das práticas mundiais, devendo ser modificado e atualizado conforme o amadurecimento organizacional das instituições e da elevação do nível de exigência da sociedade. Provavelmente, para cada caso de estudo, conforme a política setorial de energia elétrica e as políticas públicas na dimensão institucional e temporal, novos objetivos, subcritérios e pesos para a avaliação de potenciais hidroelétricos deverão ser estabelecidos. Recomenda-se a aplicação do método proposto para usinas já construídas ou usinas objeto de constestações e polêmicas.

A metodologia possibilita a aplicação em problemas que não sejam de potencial hidroenergético, mas que permitem abordagens análogas: estudos de espacialização de matrizes de geração energética, implantação de obras lineares de transportes, estações para integração de modais de transportes, estruturação de rede de aeroportos com abrangência regional e nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAIKE, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In 2nd International Symposium on Information Theory, Ed. B. N. Petrov and F. Csaki. Budapest: Akademia Kiado, p. 267-81. 1973.
- ALLEY, W. M. Regional Ground-Water Quality, 1st Edn. International Thomson Publishing, New York, NY, 1993. 634p.
- ALMEIDA, A. T.; MOURA, P. S. MARQUES, A.S., ALMEIDA, J. L. Multi-impact evaluation of new medium and large hydropower plants in Portugal centre region. Renewable and Sustainable Energy Review 9, p. 149–167. 2005.
- ALMEIDA, M. M. Regionalização de vazões médias de longo período e de volumes de reservatórios de regularização. 2010. 209 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.
- ALMEIDA, S. B.; CARVALHO, N. O. Efeitos do assoreamento de reservatórios na geração de energia elétrica: análise da UHE de Mascarenhas, ES. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Anais... Gramado, RS, p. 1-8. 1993.
- ALSDORF, D. E.; SMITH, L. C.; MELACK, J. M. Amazon Floodplain Water Level Changes Measured with Interferometric SIR-C Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, n° 2, 2001.
- ALSDORF, D. E.; RODRIGUEZ, E. The Water Elevation Recovery Mission: first mission document for the WATER Mission. Pasadena: The Ohio State University: Nasa JPL, 2005.
- AMARAL, S.; COSTA, C. B.; RENNÓ, C. D. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) improving species distribution models: an example with the neotropical genus *Coccocypselum* P. Br. (Rubiaceae). Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 2275-82. 2007.
- ANDERSON, M. L.; CHEN, Z. Q.; KAVVAS, M.; FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 7 n.4, p. 312-318. 2002.
- ANDRADE, E. M.; COSENZA, J. P.; ROSA, L. P.; LACERDA, G. The vulnerability of hydroelectric generation in the Northeast of Brazil: the environmental and business risks for Chesf. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, p. 5760-5769. 2012.

- ASLAN, Y.; ARSLAN, O.; YASAR, C. A sensitivity analysis for the design of small-scale hydropower plant: Kayabogazi case study. *Renewable Energy*;33: p. 791–801. 2008.
- ASSOCIAÇÃO INTERESSE NACIONAL. Revista Trimestral Interesse Nacional. Ano 6, número 22. 2013. Disponível em <http://interessenacional.uol.com.br/site/wp-content/uploads/2013/07/Revista-Interesse-Nacional-Edicao-22.pdf>, acessado em 19/10/2013.
- ÁVILA, C. J. C. P.; JÚNIOR, O. A. C.; GUIMARÃES, R. F.; BENTANCURT, J. J. V. Uso de ferramentas de SIG para inventário preliminar de potenciais remanescentes. In *PCH Notícias SHP News*, v. 5, n. 17, p. 24-28. 2003. Disponível em: [Http://www.cerpch.unifei.edu.br/at01.php?grp=Tecnologia e Desenvolvimento - Sistemas Elétricos](Http://www.cerpch.unifei.edu.br/at01.php?grp=Tecnologia%20e%20Desenvolvimento%20-%20Sistemas%20El%C3%A9tricos) . Acesso em 12 de novembro de 2009.
- AZEVEDO, F. M.; GRIMONI, J. A. B.; UDAETA, M. E. M. Modelagem de uma Ferramenta Analítica Aplicada ao Planejamento Integrado de Recursos Energéticos. Em: *VII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, v. 1. 2010.
- BAENA, L. G. N.; PRUSKI, D. D.; CALIJURI, F. F. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Engenharia na Agricultura, Jaboticabal*, vol. 24, nº 3, p. 612-624. 2004.
- BALLAT, H. A renewable perspective for sustainable energy development in Turkey: the case of small hydropower plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, n. 9, p. 2152-2165. 2007.
- BANA E COSTA, C.; VANSNICK, J. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *European Journal of Operational Research* 187(3): 1422–1428. 2008.
- BANA E COSTA, C.; NUNES DA SILVA, F.; VANSNICK, J. Conflict dissolution in the public sector: a case study. *European Journal of Operational Research*. 2000.
- BAND, L. E. Topography partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22(1), p. 15–24. 1986.
- BARCELLOS, M. P. B.; FIGUEIREDO, S. M.; ROCHA, A. R.; TRAVASSOS, G. Utilização de Métodos Paramétricos, Analogias, Julgamento de Especialistas e Conhecimento Organizacional no Planejamento de Tempo e Custos de Projetos de Software. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/Sistemas. II Simpósio Brasileiro de Qualidade de Software. 2003.
- BARTHOLMES, J.; TODINI, E. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol.9, pp. 333-346. 2005.

- BARTLE, A. Hydropower potential and development activities. *Energy Policy*, 30, p. 1231-1239. 2002.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of the tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 4, p. 189-236. 1974.
- BEINAT, E.; NIJKAMP, P. (Eds.). *Multi-Criteria Evaluation in Land-Use Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1998.
- BELTON, V. 'Project planning and prioritisation in the social services – an OR contribution', *Journal of the Operational Research Society*, 44, p. 115–24. 1993.
- BELTON, V. e GEAR, T. On a Short-coming of Saaty's Method of Analytic Hierarchies. *Omega*, p. 228-230. 1983.
- BELTON, V. e STEWART, T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2002.
- BELTON, V.; ACKERMANN, F.; SHEPHERD, I. Integrated support from problem structuring through to alternative evaluation using COPE and VISA. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6, p. 115–30. 1997.
- BERGSTRÖM, D.; MALMROS, C. Finding Potential Sites for Small-Scale Hydro Power in Uganda: a Step to Assist the Rural Electrification by the Use of GIS. Lund: Lund University. 2005.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- BEVEN, K; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FERRER, J., *Topmodel.in: Computer Model of Watershed Hydrology*. V. P. Singh (ed) Water Resources Publication. Fort Collins, 1994.
- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classifications. *A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons, 1989. 251p
- BIRD. Licenciamento ambiental de empreendimentos hidrelétricos no Brasil: uma contribuição para o debate. Banco Mundial, v. 11. Relatório principal. Brasília, 2008.
- BIRKETT, C. M. Surface water dynamics in the Amazon Basin: application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, 2002.
- BISWAS, A. K. Integrated water resources management: a reassessment. *International Water Resources Association. Water International*, v. 29, n. 2, p. 248-256. 2004.

- BØCKMAN, T.; FLETEN, S. E.; JULIUSSEN, E.; LANGHAMMER, H. J.; REVDAL, I. Investment timing and optimal capacity choice for small hydropower projects. Department of Industrial Economics and Technology Management, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2006. Disponível em, http://www.iot.ntnu.no/users/fleten/BFJLR_Des06.pdf. Acesso em 6/11/2013.
- BOLEA, M. T. E. Evaluacion del Impacto Ambiental. Madrid, Mapfre.1984.
- BRASIL (a). Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília, 2007.
- BRASIL (b). Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Plano decenal de expansão de energia: 2007-2016. Brasília, 2007.
- BRUGHA, C. Structure of multi-criteria decision-making. *Journal of the Operational Research Society*55(1): p. 1156–1168. 2004.
- BUCHHOLZ, T.; RAMETSTEINER, E.; VOLK, T. A.; LUZADIS, V. A. Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments. *Energy Policy* 37, p. 484-495. 2009.
- BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York), 1998. 190 p.
- CADERNO SETORIAL DE RECURSOS HÍDRICOS – Geração de energia hidrelétrica. Brasília, MMA/SRH, 2006.
- CÂMARA, G; FREITAS, U. Perspectivas em Sistemas de Informação Geográfica. São José dos Campos: INPE, 1997. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/fatorgis95.pdf>. Acesso em: 27 set. 2006.
- CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S.; CRUZ, O. G.; CORREIA, V. Análise Espacial de Áreas, In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Análise Espacial de Dados Geográficos. Planaltina, Brasília, DF: Ed. Embrapa Cerrado, 2004.
- CAMARA, G.; MONTEIRO A. M.; SPOSATI, A.; ROMAN, R.; KOGA, D.; AGUIAR, A. P. D. DE. Territórios Digitais: As Novas Fronteiras do Brasil. Seminário Temático Preparatório para a 3ª CNCTI. Brasília, 2005.
- CÂMARA, G; MONTEIRO, A. M.; CARVALHO, M. - “Análise Espacial e Geoprocessamento” - Curso on-line, INPE, 2002.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Superfícies. In: Análise Espacial. Cap. 3, 2001. Disponível em

<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies.pdf>. Acesso em: 12/8/2013.

CAMPAGNOLI, F. A Aplicação do Assoreamento na Definição de Geoindicadores Ambientais em Áreas Urbanas: Exemplo da Bacia do Alto Tietê (SP). Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2002.

CAMPAGNOLI, F. The Production of the sediment from South America: propose of mapping of the erosion rates based on geological and geomorphological aspects. Revista Brasileira de Geomorfologia, ano 7, n.1. p. 3-8. 2006.

CAMPAGNOLI, F. e DINIZ, N. C. Gestão de Reservatórios de Hidrelétricas. ISBN 978-85-7975-037-3. Oficina de Textos. São Paulo, 2012. 192 p.

CANADA, DEPARTMENT OF ENVIRONMENT. Canadian climate normals or averages p. 1971 a 2000. Disponível em: http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_e.html; 2009.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanogr., 22: p. 361-369. 1977.

CARVALHO, L. M. T. Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto dos Recursos Florestais. Lavras. UFLA/FAEPE, 2005.

CARVER, S. J. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International Journal of Geographical Information System, 5(3), p. 321-339. 1991.

CASTIGLIONI, S.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A. Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation. Journal of Hydrology 378, p. 272–280. 2009.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. DE A; BRANDÃO, R.; LEITE, A. L. DA S. Considerações sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hídrico Brasileiro. Texto de Discussão n.o 15. GESEL/IE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 2010.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. DE A; BRANDÃO, R.; LEITE, A. L. DA S. Bioeletricidade e a Indústria de Alcool e Açúcar: possibilidades e limites. Synergia. Rio de Janeiro. 2008.

CBH-DOCE: Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, Agência Nacional das Águas, 2006.

CETESB. IAP – Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público. Relatório técnico. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo, 2011. 5 p.

- CHAISSOMPHEB T.; TANUTPONGPALIN N. Application of geographic information system to site selection of run-of-river type small hydropower project based on environmental criteria. *Eng Inst Thailand Res Dev J*;15(4): p. 37–47. 2004.
- CHATZIMOURATIDIS, A. I. e PILAVACHI, P. A. Decision support systems for power plants impact on the living standard. *Energy Conversion and Management* 64, p. 182–198. 2012.
- CHAVES, H. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, vol. 07, nº 3, p. 43-51. 2002.
- CHOKMANI, K.; OUARDA, T. B. M. J. Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites. *Water Resour. Res.* 40, W12514. doi:10.1029/2003WR002983. 2004.
- CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1. 1981.
- COELHO, A. L. N. Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES. 2007. 227 f. Tese de Doutorado (Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia), Niterói. 2007b.
- COELHO, A. L. N. Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Doce (MG/ES) com Base em Imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). *Caminhos da Geografia - revista on line*. Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia. ISSN 1678-6343. 2007a. Disponível em: <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>, acessado em: 26/8/2013.
- CONNOLLY, D.; MACLAUGHLIN, S.; LEAHY, M. Development of a computer program to locate potential sites for pumped hydroelectric energy storage. *Energy*, 35, p. 375-381, 2010.
- COSER, M. C. Regionalização de Vazões Q7,10 no Estado do Espírito Santo. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.
- COSTA, W. D. *Geologia de barragem*. ISBN 978-85-7975-054-0. Capítulo 2, Fases e métodos de investigação geológico-geotécnica em barragens, p. 31 -41. Editora Oficina de Textos, 2012.
- CRUZ, P. T. DA. *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

- CUNDERLIK, J.; SIMONOVIC, S. P. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC/HMS hydrologic model: Assessment of water resource risk and vulnerability to changing climatic condition. Project Report n° 048. ISSN (print) 1913-3200. ISSN (on line) 1913-3219. Universit of Western Ontario. 2004. Disponivel em: <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=wrrr>. Acesso em 1/11/2013.
- CURKENDALL, D. W.; FIELDING, E. J.; CHENG, T. -H.; POHL, J. M. A computational-gridbased system for continental drainage network extraction using SRTM digital elevation models. Proceedings of the HPSECA/IPCC conference, Taiwan. 2003.
- CUYA, D. G. P.; BRANDIMARTE, L.; POPESCU, I.; ALTERACH, J.; PEVIANI, M. A GIS-based assessment of maximum potential hydropower production in La Plata basin under global changes. *Renewable Energy* 50 p 103-114. 2013.
- CYR, JEAN-FRANÇOIS; LANDRY M.; GAGNON, Y. Methodology for the large-scale assessment of small hydroelectric potential: Application to the Province of New Brunswick (Canada). *Renewable Energy* 36, p. 2940 - 2950. 2011.
- DAIM, T.; COWAN, K. Assessing renewable energy portfolio futures with multiple perspectives: The case of the northwest US. *Technology in Society* 32, p. 255–263. 2010.
- DAVIS, CA: Institute for Water Resources HEC-GeoHMS. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual . 2009.
- DEERE, D. U. e DEERE, D. W. O índice da designação da qualidade da rocha (RQD) na prática. Em *Rock classification systems for engineering purposes (Sistemas de classificação de rochas para fins de engenharia)*, ed. L. Kirkaldie, ASTM Special Publication 984, p. 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat. 1988.
- DEERE, P. V. Technical description of cores for engineering purposes. *Felsmech Ingenieurgeol.* 1, p. 16-22. 1964.
- DEPARTMENT OF ALTERNATIVE ENERGY DEVELOPMENT AND EFFICIENCY - DEDE. The Department of Energy Development and Promotion -DEDP. The study of master plan on small hydropower project development in Thailand. Bangkok: Ministry of Science Technology and Environment; 2004.
- DETR. A New Deal for Trunk Roads in England: Understanding the New Approach to Appraisal Available from Highways Economics and Traffic Appraisal Division, DETR, Great Minster House, Zone 3/08, 76 Marsham Street, London SW1P4DR. 1998.
- DICKINSON, H.; FLANAGAN, I.; WHITTINGTON, H. Hydroelectric power in China. *Energy Policy*, p. 354-356. 1982.

- DOMÉNECH, S. R.; ROMERO, F. C. Valoración AHP de los ecosistemas naturales de la Comunidad Valenciana. *Revista Valenciana d'Estudis Autònoms*, n. 27, 2º trimestre, 1999.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília: EMBRAPA (ISBN 85-7383-260-6), 2004.
- DUDHANI, S.; SINHA A. K.; INAMDAR, S. S. Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India. *Energy Policy* 34, p. 3195–3205. 2006.
- DUTRA, R. M. Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA, 2007. Tese de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND - EGAT. The feasibility study of Mae Hong Son small hydropower project. Nonthaburi, Thailand: Hydro PowerEngineering Department. 2007.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. Metodologia para Regionalização de Vazões. Rio de Janeiro, 1985.
- ELETROBRÁS. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. 2000. Disponível em Portal PCH: <http://www.portalpch.com.br/index.php/diretrizes-para-estudos-e-projetos-de-pequenas-centrais-hidreletricas>. Acessado em: 20/8/2013.
- ELETROBRÁS. Manual de Inventário. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas. Cepel – Grupo ELETROBRÁS e Projeto Estal – Energy Sector Technical Assistance Loan. 2007.
- ELETROBRÁS. Potencial hidrelétrico brasileiro (Sipot). Disponível em: <http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMIS21D128D3PTBRIE.htm>. Acesso em: 07/08/2012.
- ELETROBRÁS/CEPEL. Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas. 2007. Disponível em http://www.aneel.gov.br/cedoc/aprt2009372mme_2.pdf. Acessado em 6/10/2013.
- EPE. Matriz Energética Nacional 2030. Brasília, MME/EPE, 2007. 159 p.
- ESHA. EUROPEAN SMALL HYDROPOWER ASSOCIATION. Thematic Network on Small Hydropower (TNSHP). Project, European Commission – DG TREN (Transport & Energy). Small Hydropower for Development Countries, 2006. Disponível em: <http://www.managenergy.net/actors/495>. Acesso em: 06/08/2012.

- ESHA/SERO/IEFE. Blue energy for a green Europe (BlueAGE). Strategic study for the development of small hydropower in the European Union. Report of Altener Programme. Brussels. 2001. Disponível em <http://www.esha.be>. Acesso em 31/10/2013.
- ESRI. ArcGis 10 Desktop Help. 2011. Disponível em <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z000000sr000000.htm>, acessado em 17/9/2013.
- ESRI (ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE). Using ArcGIS Spatial Analyst. Redlands: ESRI, 2002.
- ESRI, ARCGIS DESKTOP 10 HELP, 2012. Disponível em: em http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Understanding_drainage_systems. Acessado em: 21/8/2012.
- EUCLYDES, H. P. Atlas digital das águas de Minas; uma ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Coordenação técnica, direção e roteirização Humberto Paulo Euclides. Belo Horizonte: RURALMINAS ; Viçosa : UFV, 2007. 1 CD_ROM + manual (78p). ISBN 85.7601-082-8.
- EUCLYDES, H. P. Ferramenta para o planejamento e gestão de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais - HIDROTEC. Viçosa: UFV, DEA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS. 2010. Disponível em: http://www.hidrotec.ufv.br/o_hidrotec/historico.html.
- EUCLYDES, H. P.; SOUSA, E. F.; FERREIRA, P. A. Regionalização hidrológica, manual do programa. Viçosa, MG: UFV / MMA /RURALMINAS, 1999.149 p.
- EURELECTRIC: The cost of hydroelectricity. Eurelectric, Brussels, Belgium, 2000. <http://www.eurelectric.org>. 2000.
- FARIA FILHO, R. F. Avaliação do potencial hidráulico de bacias hidrográficas por meio de sistemas de sistemas informações geográficas. 2007. 58 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- FARIA, M. A. F. Metodologia de prospecção de pequenas centrais hidrelétricas. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- FAYAD, M. E.; SCHIMIDT & D. C.; JOHNSON, R. E. Implementing application *Frameworks*: object-oriented *Frameworks* at work. New York: J. Wiley, 729 p. ISBN 0471252018.1999.

- FELIX, J.; DUBAS, A. Use of GIS to identify potential sites for small hydroelectric plants: general concepts and example of application. In Proceedings of the International Conference HIDROENERGIA 2010. Lausanne, Switzerland, June 2010.
- FERNANDEZ, G. P.; CHESCHEIR, G. M.; AMATYA, D. M. DRAINMOD-GIS: A lumped parameter watershed scale drainage and water quality model. *Agricultural Water Management* 81, p. 77–97. 2006.
- FIGUEIRA, J.; GRECO, S; EHRGOTT, M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. New York: Springer-Verlag, 2005.
- FILHO, A. V. Energia elétrica no Brasil: contexto atual e perspectivas. *Interesse Nacional*, ano 6, n. 21, p. 14-25, abr.-jun. 2013. Disponível em: <<http://interessenacional.uol.com.br/index.php/edicoes-revista/energia-eletrica-no-brasil-contexto-atual-e-perspectivas/>>International Hydropower Association – IHA. Hydropower Sustainability Assessment Protocol. Acesso em: 02/08/2013.
- FILHO, W. M. M.; VENDRAME I. F.; CARVALHO, R. G.; Utilização de sistema de informações geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Anais XIII, Florianópolis. p. 3453-3460. 2007.
- FINLAY, P. Introducing Decision Support Systems. Blackwell Ltd, 1994.
- FLEMING, M; DOAN, J. HEC-GeoHMS: Geospatial Hydrologic Modeling Extension. Davis: U. S. Army Corps of Engineers, 2009.
- FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M. E. Geographically Weighted Regression, the Analysis of Spatially Varying Relationships. Wiley, United Kingdom, UK. 2002.
- FRENCH, S.; XU, D. L. Comparison study of multi-attribute decision analytic software. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. doi:10.1002/mcda. 2005.
- FREY, G. W.; LINKE, D. M. Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way. *Energy Policy* 30, p. 1261–1265. 2002.
- GALVÃO, L. C. R.; GRIMONI, J. A. B.; UDAETA, M. E. M.; KANAYAMA, P. H. Planejamento Integrado de Recursos Energéticos como Instrumento de Desenvolvimento Limpo. Em: XII Congresso Brasileiro de Energia - Desafios do Setor Energético Brasileiro, v. IV, p. 1523-1535. 2008.
- GARBRECHT, J. e MARTZ, L. W. TOPAZ Version 1.20: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization - Overview. *GRL* 97-2,

- Grazinglands Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service, El Reno, Oklahoma, 1997. 21 p.
- GARCIA, L. V.; ANDREAZZA, A. M. P. Estabelecimento de vazões ambientais efluentes de barragens: Sugestão metodológica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 9, n.3, 2004.
- GASSER, T. e MILLER, H. G. Kernel estimation of regression functions. *Lect. Notes Math.*, 757, 2348. 1979.
- GISMALLA Y. A.; BRUEN M. Use of GIS in reconnaissance studies for small-scale hydropower development in a developing country: a case study from Tanzania. In: Kovar K, Nachtnebel HP, editors. 1996. *Hydro GIS '96: application of geographic information systems in hydrology and water resources management*. In: *Proceedings of the Vienna conference*. AIHS publishing; 2006; 235: p. 307–12.
- GORDON, T. J. “The Delphi Method”, *Futures Research Methodology*, V 2.0. AC/UNU Millennium Project, 1994.
- GREGORY, R., Using stakeholder values to make smarter environmental decisions, *Environment*, 42(5). 2000.
- HALL, D. G.; CHERRY, S.J.; KELLY, S.R.; LEE, R.D.; CARROLL, G.R.; SOMMERS, G.L.; VERDIN, K.L. *Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources.* DOE/ID-11111. US Department of Energy, 2004.
- HALL, D. G.; REEVES, K. S.; BRIZZEE, J.; LEE, R. D.; CARROLL, G. R.; SOMMERS, G. L. *Feasibility Assessment of the Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants*. DOE-ID-11263. Idaho National Laboratory, 2006.
- HÄTTENSCHWILER, P. *New user-friendly design of decision support*. *Gutes Entscheiden in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft*. Zurich, vdf Hochschulverlag. p.189-208, 1999.
- HELFERT, E. A. *Técnicas de Análise Financeira*. 9ª Ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 1997.
- HERVA, M.; FRANCO, A.; CARRASCO, E. F.; ROCA, E. Review of corporate environmental indicators. *J. Clean. Prod.* 19, p 1687-1699. 2011.
- HERVA, M.; ROCA, E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production* 39, p. 355 - 371. 2013.

- HOBBS, B. F.; HORN, G. T. H. Building public confidence in energy planning: a multimethod MCDM approach to demand-side planning at BC gas. *Energy Policy* 25 (3), p. 357–375. 1997.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletins of the Geological Society of America*, v. 56, p. 275-370, 1945. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies.pdf>. Acesso em: 12/8/2013.
- HURVICH, C. M.; TSAI, CHIH-LING. Bias of the corrected AIC criterion for underfitted regression and time series models. *Biometrika* 78, 3, p. 499-509. 1991.
- INEEL. IDAHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY. Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources. 2004. 52p. Disponível em http://hydropower.inel.gov/prospector/enable_popup.shtml. Acesso em 12/10/2013.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Altera a redação da Portaria Nº 030/93, de 07 de junho de 1993. Portaria número 10, de 30 de dezembro 1998. Diário do Executivo – “Minas Gerais”. Publicado em 23 jan. 1999.
- ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and limitations. *Operational Research Society Ltd 0953-5543 OR Insight* Vol. 22, 4, p. 201–220. 2009.
- ISHIZAKA, A.; LUSTI, M. An expert module to improve the consistency of AHP matrices. *International Transactions in Operational Research* 11(1): p. 97–105. 2004.
- ISO 21500. Norma ISO 21500 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 21500:2012 – Orientações sobre Gerenciamento de Projetos. ABNT. 2012.
- JANKOWSKI, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information System*, 9, 251-273. 1995.
- JENSON S. K. e J. O. DOMINGUE. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): p. 1593–1600. 1988.
- KAINULAINEN, T.; LESKINEN, P.; KORHONEN, P.; HAARA, A.; HUJALA, T. A statistical approach to assessing interval scale preferences in discrete choice problems. *Journal of the Operational Research Society* 60(2): 252–258. 2009.

- KALDELLIS, J. K.; VLACHOU, D. S.; KORBAKIS, G. Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis. *Energy Policy*;33: p. 1969–85. 2005.
- KARLIS, A.; PAPADOPOULOS, D. A. systematic assessment of the technical feasibility and economic viability of small hydroelectric system installations. *Renewable Energy*;20: p. 253–262. 2000.
- KEEN, P. G. W. *Decision support systems: A research perspective*. 1 ed. Cambridge: Center for Information Systems Research, 1980. 50 p.
- KIER. Precise study on the small hydro power resources and optimal development (I). KE-89–19. Daejeon: Korea Institute of Energy Research, 1989.
- KIER. Precise study on the small hydro power resources and optimal development (IV). KE-92029G. Daejeon: Korea Institute of Energy Research, 1990.
- KIER. Precise study on the small hydro power resources and optimal development (IV). KE-92029G. Daejeon: Korea Institute of Energy Research, 1992.
- KIER. Research and development on small scale hydro power generating system (II). KE-83–5. Korea Institute of Energy Research, 1983.
- KIER. Research and development on small scale hydro power generating system (III). KE-84–5. Daejeon: Korea Institute of Energy Research, 1984.
- KISHOR, N.; SAINI, R. P.; SINGH, S. P. A review on hydropower plant models and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*;11: p. 776–96. 2007.
- KLIMPT, J. E.; RIVERO, C.; PURANEN, H.; KOCH, F. Recommendations for sustainable hydroelectric development. *International Journal of Energy Policy* 30, p. 1305–1312. 2002.
- KOWALSKI, K.; STAGL, S.; MADLENER, R.; OMANN, I. Sustainable energy futures: methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. *European Journal of Operational Research*. 2008.
- KUMAR, A.; REES, G.; RAGHUVANSHI, T. K. Small hydropower assessment-a solution through hydra-hp. MAP INDIA 2002. Anais eletrônicos. New Delhi: 2002. Disponível em <http://www.gisdevelopment.net/application/utility/power/utilityp0009pf.htm>. Acesso em 12/10/2013.
- KUMAR, A.; SINGHAL, M. K. Hydro power assessment for small ungauged catchments in Himalayan region using GIS techniques. MAP INDIA 1999. Anais eletrônicos. New Delhi, 1999. Disponível em <http://www.gisdevelopment.net/application/utility/power/utilityp0002pf.htm>. Acesso em 12/10/2013.

- KURSE, B. C; BARUAH, D. C.; BORDOLOI, P. K; PATRA, S. C. Assessment of hydropowerpotential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basinin Asam (India). *Applied Energy*;87: p. 298 - 309. 2010.
- KUSHWAHA, S. P. S.; SUBRAMANIAN, S. K.; CHENNAIAH, G. CH.; RAMANA MURTHY, J.; KAMESHWARA S.V.C., PERUMAL, A.; BEHERA, G. Interfacing remote sensing and GIS methods for sustainable rural development. *International Journal of Remote Sensing* (17), p. 3055–3069. 1996.
- KWIESIELEWICZ, M. e VAN UDEN, E. Inconsistent and contradictory judgements in pairwise comparison method in AHP. *Computers and Operations Research* 31(5): p. 713–719. 2004.
- KWON, Y. H.; KIM, J. Y. Research on environmental influences of small hydropower development. KEI 2006 WO-14. Seoul: Korea environment institute, 2006.
- LAHDELMA, R.; SALMINEN, P.; HOKKANEN, J. Using multicriteria methods in environmental planning and management. *Environmental Management* 26(6), p. 595-605. 2000.
- LAKO, P.; EDER, H.; NOORD, M.; REISINGER, H. Hydropower Development with a focus on Asia and Western Europe, Overview in the *Framework* of VLEEM 2. ECN-C--03-027, July 2003.
- LARENTIS, D. G. Undeveloped hydropower potential survey [Prospecção de Potencial Hidrelétrico Remanescente]. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, RS: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 2009.
- LARENTIS, D. G; COLLISCHONN W.; OLIVERA F.; TUCCI C. E. M. Gis-based procedures for hydropower potential spotting. *Energy* 35, p. 4237 a 4243. 2010.
- LEDEC, G.; QUINTERO, J. D. Good Dams and Bad Dams: Environmental Criteria for Site Selection of Hydroelectric Projects, the World Bank, Washington, USA. 2003. Disponível em http://siteresources.worldbank.org/LACEXT/Resources/258553-1123250606139/Good_and_Bad_Dams_WP16.pdf. Acessado em: 5/10/2013.
- LEE, R.; BRIZZEE, J.; CHERRY, S.; HALL, D. G. Virtual Hydropower Prospecting: A Foundation for Water Energy Resource Planning and Development. *Journal of Map & Geography Libraries*. DOI:10.1080/15420350802142678. p. 336-347. 2008.
- LEHNER, B.; VERDINI K.; JARVIS A. HydroSHEDS – Technical Documentation. Versão 1, 2006. 27 p. Disponível em <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>, acesso em 27/8/2013.

- LIMA, R. R. M.; MELLO, M. T. C.; CASTRO, A. C. R. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação na Prospecção de Potencial Hidroelétrico para PCHs. Artigo técnico presente na Revista PCH Notícias & SHP NEWS - Número 54. 2012.
- LISBOA, L. Estimativa e Regionalização das vazões mínimas e médias na bacia do rio Paracatu. Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa - MG, vol. 16, nº 4, p. 471-479, out./dez. 2008.
- LIU, Y.; YE, L. Economic performance evaluation method for hydroelectric generating units. Energy Conversion and Management; 44: p. 797–808. 2003.
- LO, C.P.; YEUNG, A. K. W. Concepts and Techniques of Geographic Information Systems. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 2002.
- MACÊDO, I. L. Estudos de modelos em ambiente de geoprocessamento para previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: O caso da bacia do rio Indaiá - UHE Três Marias, MG. 2009. 340 p. Tese (Doutorado) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2009.
- MAGNO, R. A. M. Regressão geograficamente ponderada aplicada ao estudo da relação pecuária e desmatamento no sudeste do estado do Pará. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil. INPE. 2011. 2899 p.
- MAGUIRE, D., BATTY, M., GOODCHILD, M. GIS, Spatial Analysis and Modeling. New York: ESRI Press. 2005.
- MAIDMENT, D. R. ArcHydro GIS for Water Resources. ESRI Press, Redlands, California. 2002.
- MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L. T. Environmental modeling with GIS. New York; Oxford University Press, p. 147-167. 1993.
- MAIDMENT, D. R. "Hydrologic Data and Modeling – towards Hydrologic Information Science", NSF EPsCOR meeting, University of Vermont, Burlington, 11 November 2008.
- MAIDMENT, D. R.; DJOKIC, D. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems; ESRI Press: Redlands, CA, USA,. 2000. 232 p.
- MARK, D. M. Automatic Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models. Cartographica, 21(2/3):168-178. 1984.
- MARK, D. M. Network models in geomorphology. In: ANDERSON MG, editor. Modelling in Geomorphological Systems. New York: John Wiley and Sons; p. 73-97.1988.

- MARKS, D.; DOZIER, J.; FREW, J. Automated basin delineation from digital elevation data: Geo-Processing, 2 pp. 299-311. 1984.
- MARTZ, L. W. e GARBRECHT, J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. Computers & Geosciences 25, p. 835-844. 1999.
- MARTINEZ, C.B; AGUIRRE, L. A.; NASCIMENTO FILHO, J.; LOPES, J. C. R. Sistemas de Monitoramento de Rendimento em Usinas Hidrelétricas. IX Encontro Latino-americano e do Caribe sobre Pequenos Aproveitamentos Hidro energéticos - IX ELPAH. 2006.
- MATHERON. The theory of regionalized variables and its applications. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleu, 1971. 211 p.
- MAURO FILHO, I; ZANIN, W. R. Viabilização de PCHs: Conexão Elétrica. PCH Notícias e SHP News. 2011. Artigo Técnico nº 17 publicado pelo Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidroelétricas – CERPCH. Disponível em: http://www.cerpch.unifei.edu.br/resumo_art.php?id=14. Acesso em: 31/102013.
- MCCOY, J. e JOHNSTON, K. Using ArcGIS Spatial Analyst, ESRI. Cursos Introduction to Spatial Analyst e 3d Analyst do Virtual Campus da ESRI. 2001.
- MELO, M. S. Efeitos da Precisão dos Modelos Digitais de Elevação na obtenção de parâmetros fisiográficos e hidrológicos com o suporte de Sistemas de Informações Geográficas. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará.
- MIMIKOU, M. Regional analysis of hydrological variables in Greece. Proceedings of Ljubljana Symposium. Reino Unido: nº 191, Abril, 1990.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Plano Nacional de Recursos Hídricos, 2005. Disponível em: <<http://pnrh.cnrh-srh.gov.br/>>.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Caderno Setorial de Recursos Hídricos – geração de energia hidrelétrica. Brasília, MMA/SRH, 2006.
- MIRZA, U. K.; AHMADA, N.; MAJEEDA, T.; HARIJANB, K. Hydropower use in Pakistan: past. present and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12, n. 6, p. 1641-1651, 2008.
- MITCHELL, ANDY. The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2. ESRI Press, 2005.

- MME. Ministério das Minas e Energia. Nota Técnica. MME/SPD/05. Garantia Física de Energia e Potência: Metodologia, Diretrizes e Processo de Implantação. 2004.
- MME/CEPEL. Manual do Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas. Ministério das Minas e Energia, Centro de Pesquisas Elétricas da UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.
- MME/EPE. Balanço Energético Nacional: 2006 (Resultados preliminares). Rio de Janeiro, 2007.
- MOREIRA. M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação 3 ed Viçosa ED UFV, 2005.
- MST. MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF KOREA. A development study on small hydropower system, 1985.
- MÜLLER, A. C. Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento. São Paulo, Makron Books, 1995.
- MULTI-CRITERIA ANALYSIS: A MANUAL. Department for Communities and Local Government: London. 2009. Disponível em http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf, acessado em 26/9/2013.
- MUNGWENA W. Hydropower potential on Zimbabwe's major dams. Renewable Energy; 25: p. 455–62. 2002.
- NATURAL RESOURCES CANADA. User Manual for Integrated Method for Power Analysis (IMP 5.0.); POWEL: Victoria, Canada, 2004.
- NETER, J.; KUTNER, M. H.; MACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. Applied linear statistical models. Chicago: Irwin, 1996.
- NETO, J. L. F. Breve análise sobre o Potencial Hidrelétrico brasileiro. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH). 2013. Documento publicado na internet, disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/revistas/34/c5e4c439a3b487252d4cca48f5981417.pdf>. Acesso em 31/10/2013.
- NEW ENERGY FOUNDATION - NEF. Guide manual for development aid programs and studies of hydro electric power projects. Tokyo, Japan: Hydroelectric Power Development Center, New Energy Foundation; 1996.
- NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. Journal of Hydrology 404, p. 13–29. 2011.

- NOVO, E. M. L. DE M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 328 p.
- NOVO, E. M. L. DE M. Ambientes Fluviais. Capítulo 8, pags. 219 a 246. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. Teresa Gallotti Florenzano, (org.) São Paulo. Oficina de Textos. 2008.
- NREL. THE NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Assessment of microhydro resources in the Philippines. NREL; Under contract with the US Agency for International Development. 2000.
- O'DONNELL, G.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models. Hydrological Processes, v. 13, n. 8, p. 1269-1275, 1999.
- O'CALLAGHAN, J. F. e MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics and Image Processing 28: p. 323-344. 1984.
- OECD. Organization for Economic Co-operation and Development. Eutrophication of waters: monitoring/assessment and control. Paris: OECD, 1982. 154 p.
- OLIVEIRA, V. S. Regressão Ponderada Geograficamente para os Dados do Censo IBGE. Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. São José dos Campos – SP. 2006.
- OLIVEIRA, F.; LEAR, M. S.; FAMIGLIETTI, J. S.; ASANTE, K. Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models. Water Resources Research, v. 38. n. 11, 2002. 1231 p.
- OLIVERA, F. e MAIDMENT, D. R. Geographic information systems based spatially distributed model for runoff routing, Water Resources Research, Vol. 35, No. 4, p. 1155-1164, 1999.
- OLIVERA, F. Using ArcGIS,HEC-GeoHMS and HEC-HMS to Model Ticky Creek WatershedWalter McDonald. Texas A & M University Zachary. Department of Civil Engineering. CVEN 658 Civil Engineering Applications of GIS. 2010.
- OMM. ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Guía de Prácticas Hidrológicas. Adquisición y Proceso de Datos, Análisis, Predicción y otras Aplicaciones. OMM, Nº 168, Quinta Edición, 1994, 781 p.
- OUARDA, T. B. M. J.; BÁRDOSSY, A. Regional estimation of parameters of a rainfall-runoff model at ungauged watersheds using the “spatial” structures of the parameters within a canonical physiographic climatic space. Water Resour. Res. 44, W01427.doi:10.1029/2006WR005439. 2008.

- OZTURK, M.; BEZIR, N. C.; OZEK, N. Hydropower-water and renewable energy in Turkey: sources and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 3, p. 605-615, 2009.
- PAISH, O. Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 6, n. 6, p. 537-556, 2002.
- PARADELLA. W. R.; SANO. E E. Geotecnologias: trilhando novos caminhos nas geociências. Capítulo 3. Aplicações de RADAR nas geociências e meioambiente: estado atual e perspectivas. Org. Joselisa Mana Chaves. Washington J. S. da Franca-Rocha. Salvador: SBG. 2006. 222 p.
- PAZ. A. R.; COLLISCHONN. W.; RISSO, A.; MENDES. C. A. B. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. *Computers & Geosciences*, v. 34, n. 11, p. 1584- 1596, 2008.
- PEREIRA I. C. N.; MENEZES. P M. L. O RADAR como instrumento de geração da informação espacial para a gestão do território na Amazônia: uma análise do Projeto Radam. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE. Florianópolis /SC. p. 6913-6920. 2007.
- PETERSON H. M.; NIEBER J. L.; KANIVETSKY R. Hydrologic regionalization to assess anthropogenic changes. *Journal of Hydrology* 408, p. 212–225. 2011.
- PFAFSTETTER, O. Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989. 19 p. Manuscrito não publicado.
- PIJANOWSKI, B. C.; GAGE S. H.; LONG D. T. A land transformation model: integrating policy, socioeconomics and environmental drivers using a geographic information system. In: L. Harris e J. Sanderson (Eds.). *Landscape ecology: a top down approach*. Lewis Publishers, Boca Raton. 2000.
- PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. *Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia*. 1ª Edição, Brasília, Ministério das Minas e Energia. 2008.
- PMBOK – PROJECT MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE. PMI – Project Management Institute. 2000.
- PMI. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Newton Square, 2013.
- PMI/PMBOK, PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)*, Quarta edição, 2008.

- POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN. M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning-A review. *Renewable and Sustainable Energy Review* 8, p. 365–381. 2004.
- POLIZEL, L. H. Metodologia de prospecção e avaliação de pré-viabilidade expedita de geração distribuída: caso eólico e hidráulico. 2007. 160p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- POWER, D. J. What is DSS? *The On-line Executive Journal for Data Intensive Decision Support*, California, 1997.
- POWER, D. J. *Decision support systems: concepts and resources for managers*. Westport, Conn., Quorum Books, 2002.
- PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.2/3, p.247-253, Campina Grande, PB, DEAg/UFCG. 2004. Disponível em <http://www.agriambi.com.br>., acessado em 30/8/2013.
- PRUSKI, F. F.; PEREIRAS, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.2/3, p.247-253, 2004. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG. Disponível em <http://www.agriambi.com.br>, acessado em 7/9/2013.
- Publicação Técnica: Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. 2002. Disponível em http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200062&script=sci_arttext, acessado em 21/8/2013.
- PUNYS, P.; DUMBRAUSKAS, A.; KVARACIEJUS, A.; VYCIENE, G. Tools for Small Hydropower Plant Resource Planning and Development: A Review of Technology and Applications. ISSN 1996-1073. *Energies*, 4, p. 1258-1277; doi:10.3390/en4091258. 2011.
- PUNYS, P.; PELIKAN, B. Review of small hydropower in the new Member States and Candidate Countries in the context of the enlarged European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, n.7, p. 1321-1360. 2007.
- QUEIROGA, Y. G. A. Análise das previsões de precipitação do Modelo ETA realizadas durante a operação do Sistema de Alerta Contra Enchentes da Bacia do Rio Doce. Belo Horizonte, 2006.

- RADINGER J.; KAIL J.; WOLTER C.; FIDIMO — A free and open source GIS based dispersal model for riverine fish. *Ecological Informatics*. 2013.
- RAMACHANDRA, R. A.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India. *Journal of Hydrology* 318, p. 37–56. 2006.
- REED, S. M. Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling. *Water Resources Research*, v 39. n. 9, 1238, 2003.
- REIGBER. A SAR Interferometry - na Introducion Rennes. França. 2001.
- REIS, A. G.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R.; AZEVEDO, F. M. Aspectos Sistêmicos da Geoenergia no Contexto do Planejamento Energético. Conference Name VIII CBPE - Energia para o Século XXI: Sociedade e Desenvolvimento. 2012.
- 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* 112: 3469-81. 2008.
- RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES, F DE A; SILVA, D. D. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio doce. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG: AEAGRI - MG, v.13, n.02, p. 103-117, abr./jun. 2005.
- RIDDER, W., Sustainability A-Test Project: Deliverable 3. Draft Methodology Report. Institute for Environmental Studies, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1e63.2004.
- RIDDER, W., Sustainability A-Test Project: Deliverable 3. Draft Methodology Report. Institute for Environmental Studies, Amsterdam, The Netherlands, pp.1e63. 2004.
- RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, R. F. DE. Avaliação da Adequação dos Produtos ASTER GDEM no Auxílio ao Mapeamento Sistemático Brasileiro. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010, p. 001 – 005. 2010.
- RODRIGUEZ E.; MORRIS C.; BELZ J. A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*;72(3): p. 249 - 260. 2006.
- ROJANAMON, P; CHAISOMPHOB, T; BUREEKUL, T. Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economical/environmental criteria and social impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*;13: p. 2336e48; 2009.

- ROJANAMON P; CHAISOMPHOB T; RATTANAPITIKON W. Regional flow duration model for the Salawin river basin of Thailand. *ScienceAsia J Sci Soc Thailand*;33: p. 411–419. 2007.
- ROSA, L. P.; SIGAUD, L.; LA ROVERE, E. L.; MAGRINI, A.; POOLE, A.; FEARNSIDE, P. Estado, Energia Elétrica e Meio Ambiente: O Caso das Grandes Barragens. COOPE/UFRJ. 1995.
- SAATY, T. L. "Priorities and Hierarchies: Eigenvalue Structure" Paper de trabalho, University of Pennsylvania, 1972.
- SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill International, New York, NY, U.S.A. 1980.
- SAATY, T. L. *Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*. Pittsburgh: RWS Publications. 2005.
- SADOK, W.; ANGEVIN, F.; BERGEZ, J.-E.; BOCKSTALLER, C.; COLOMB, B., GUICHARD, L.; REAU, R.; DORÉ, T. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, p. 163e174. 2008.
- SANTOS, A. I. C. Análise dos procedimentos para implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas no Estado do Tocantins: Estudo de caso da bacia do rio Palmeiras. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado) apresentada ao programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS.
- SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. In: XII Congresso Nacional de Tecnologias de la Información Geográfica. Granada, El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas. p. 465-479. 2006.
- SARAF AK; KUMAR A. Spatial technologies in Himalayan small hydropower development. *Himalayan small hydropower summit*. Dehradun, India; p. 12–13. 2006.
- SECCHI, L. *Políticas Públicas: Conceitos, Esquemas de Análise, Casos Práticos*. São Paulo: CENGAGI Learning, 2011.
- SILER, CLARK. *A Hydrologic Information System for Water Availability Modeling*, University of Texas at Austin. 2011.
- SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. TOPMODEL: teoria integrada e revisão. R. RA´E GA, Curitiba, n. 14, p. 97-110. Editora UFPR, 2007.

- SILVEIRA, A. L. L. DA. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS, cap. 2, p. 35-40.1993.
- SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica; Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3 nº 3 Jun/Set.1998.
- SILVERMAN, B.W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall, 176p.1986.
- SKØIEN, J.O.; BLÖSCHL, G. Spatio temporal topological kriging of runoff time series. Water Resour. Res. 43, W09419.doi:10.1029/2006WR005760.2007.
- SKØIEN, J.O.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. Top-kriging – geostatistics on stream small hydropower project development in Thailand. Bangkok: Ministry of Science Technology and Environment; 2006.
- SMITH, B.; SANDWELL, D. Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. Geophysical Research Letters, VOL. 30, NO. 9, 1467, doi:10.1029/2002GL016643, 2003.
- SOARES-FILHO , B. S.; AMORIM, V. C.; NOGUEIRA, V. Metodologia para elaboração do mapa do potencial erosivo da Bacia do Rio das Velhas. GEONOMOS, v. 5, p-34-56, 1998b.
- SOARES-FILHO, B. S. Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de colonização amazônica. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP - São Paulo, Versão CD-ROM CSR, 299 p.1998a.
- SOARES-FILHO, B.S; CERQUEIRA, G.C. Geoprocessamento aplicado à avaliação ambiental de grandes empreendimentos: O uso de modelos de simulação computacional. VIII Simpósio de Geografia Física Aplicada, Anais do VIII Simpósio de Geografia Física Aplicada, SBGF, Belo Horizonte, MG, p. 305-310.1999.
- SOLIMAN, M. M. Engineering Hydrology of Arid and Semi-arid Regions. First Edition. ISBN: 978-1-4398-1555-7. Taylor and Francis Group, LLC. 2010.
- SOUZA, M. M. L. Análise dos Estudos Ambientais dos Inventários Hidrelétricos quanto a qualidade dos indicadores, bases de dados e métodos adotados, Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.470 f, UnB-GEA. 2012.
- SOUZA, W. L. Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de Duas Abordagens. Tese, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2000.

- SRDJEVIC, B.; MEDEIROS, Y.; SRDJEVIC, Z.; SCHAER, M. Evaluating Management Strategies in Paraguacu River Basin by Analytic Hierarchy Process, in Integrating Management and Decision Support. Coord. CUDDY, S. M. iEMSs, Austrália. 2002.
- STILLWELL, WILLIAM G.; WINTERFELDT, DETLOF VON; JOHN, RICHARD S. Comparing Hierarchical and Nonhierarchical Weighting Methods for Eliciting Multiattribute Value Models. *Management Science*, 33, p. 442-450.1987.
- STRAHLER, A. N. Dynamic basis of geomorphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 63, p. 923-938, 1952.
- STRAND, ROBERT I. Sedimentation – Appendix – Design of Small Dams. US Bureau of Reclamation. Washington, DC.1974.
- SUPRIYASILP T.; PONGPUT K.; BOONYASIRIKUL T. Hydropower development priority using MCDM method. *Energy Policy* 37, p. 1866–1875. 2009.
- SUPRIYASILP, T.; PONGPUT, K.; BOONYASIRIKUL, T.; BOONYANUPONG, S.; KANTAWANICHKUL, S.; TAKSA-UDOM, C.; SANTIPARAPOB, P. Study of hydropower planning and development for Ping River Basin. Science and Technology Research Institute. Research report funded by the National Research Council of Thailand. 2007.
- SUPRIYASILP, T.; PONGPUT, K.; BOONYASIRIKUL, T. Hydropower development priority using MCDM method. *Energy Policy* 37, p. 1866–1875. 2009.
- TAKEUCHI, H.; NONAKA, I. Criação e dialética do conhecimento. In: Takeuchi, H.; Nonaka, I. *Gestão do conhecimento*. Porto Alegre: Bookman, p. 17-38. 2008.
- TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models," *Water Resources Research*, 33(2): p. 309-319. 1997.
- TARBOTON, D. G.; R. L. BRAS; I. RODRIGUEZ–ITURBE. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*. 5: p. 81–100. 1991.
- TATE, E. C.; OLIVERA F.; MAIDMENT, D. R. Creating a terrain model for floodplain mapping, *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 2, p. 100-108, 2002.
- TOLEDO JR, A. P. DE; TALARICO, M.; CHINEZ, S. J.; AGUDO, E. G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Camboriú. Anais. Camboriú. p.1 – 34. 1983.

- TOMLIN, C. D. Geographic Information System and Cartographic Modelling. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1990. 249 p.
- TORRES, T. G. Geotecnologias na geração do divisor de bacias hidrográficas: um instrumento para a Política de Recursos Hídricos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul / MS. Dissertação de Mestrado. 2007.
- TOUTIN, T. Stereo Radarsat for Mapping Applications.II International ADRO Symposium Montreal.Canadá. 1998.
- TRIANANTAPHYLLOU, E. & MANN S. H. (1995). Using The Analytic Hierarchy Process For Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges. International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice, Vol. 2, No. 1, p. 35-44, 1995. Disponível em: http://www.csc.lsu.edu/trianta/Journal_PAPERS1/AHPapls1.pdf, acessado em 25/9/2013.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia 4 – Ciência e Aplicação (Segunda edição), Editora da Universidade (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) / ABRH, Porto Alegre. 2000.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 256p.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2ª edição. Porto Alegre. Editora da UFRGS. 2005.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Editora da UFRGS 652p. Editora da Universidade ABRH, 1998. 250p.
- TUNDISI, J. G. “Exploração do potencial hidrelétrico da Amazônia”, in IEA/USP, Revista Estudos Avançados 21 (59), pp. 109/117. op. cit., 2007. p. 114.
- TURBAN, E. Decision Support System and Intelligence System:Fourth Edition, Prentice Hall, 1995.
- TUROFF, M. “An Alternative Approach to Cross Impact Analysis”. In: TUROFF, Murray & LINSTONE, Harold A. The Delphi Method: Techniques and Applications. New Jersey: Institute of Technology, 2002.
- UDAETA, M. E. M. Planejamento Integrado de Recursos (PIR) para o Setor Elétrico (pensando o desenvolvimento sustentável), tese de doutorado, São Paulo – SP, EPUSP – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, 1997.
- UNDEVELOPED HYDROPOWER POTENTIAL USING GIS-BASED TOOLS. Uso de ferramentas United State Geological Survey, 2010. National Hydrography Dataset. Disponível em: <http://www.usgs.gov/> . Acesso em: 12/8/2010.

- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual, v. 1.1. Retrieved on December 12, 2004 from the Hydrologic Engineering Center web site, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-GeoHMS11.pdf>. 2003.
- USACE, Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS. User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000a. 267 p.
- USACE, Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000b.149 p.
- USGS. UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY, 2010. National Hydrography Dataset. <http://www.usgs.gov/>. Acesso em 12/8/2010.
- VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (INPE'10550'RPQ/756), 2004. 72 p.
- VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radartopographic mission-90 m data. *Computer Geosciences*, 32, p. 1169–1181. 2006.
- VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO M.; AMARAL, B. D.; MENDES, J. N.; LIMA D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. *Computers and Geoscience*, v.32, p. 1169-1181, 2005.
- VANONI, V. A. Sedimentation Engineering. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY. 1977. 743p.
- VARGAS, L. G. An Overview of the Analytic Hierarchy Process and its Applications. *European Journal of Operational Research*, 48, p. 2-8. 1990.
- VARGAS, R. V. Using Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select And Priorize Projects in a Portfolio. PMI Global Congress 2010 – North America Washington - DC - EUA. 2010.
- VERDIN K. L.; VERDIN J. P. A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. *Journal of Hydrology*; 218: p. 1e12. 1999.
- VERDIN, K. L. A System for Topological Coding Global Drainage Basin and Stream Networks. In: Annual ESRI User Conference, 17, San Diego, California, Proceedings... California, ESRI, 1997. 226p.

- VICTOR, D.; HELLER. T. The political economy of power sector reform. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- VOGEL R; BELL C; Fennessey N. Climate, streamflow and water supply in the Northeastern United States. *J Hydrol*; 198: p. 42e68. 1997.
- VUCIJAK B.; KUPUSOVIC T.; MIDZIC-KURTAGIC S.; CERIC A. Applicability of multicriteria decision aid to sustainable hydropower. *Applied Energy* 101, p. 261–267. 2013.
- WACKERNAGEL, H. *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, 3rd Edn. Springer, New York. 2003. 387 p.
- WAGENER T; WHEATER H. S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology* 320, p. 132–154. 2006.
- WAGENER, T., SIVAPALAN, M., TROCH, P., WOODS, R. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass*, 1(4), 901–931. doi:0.1111/j.1749-8198.2007.00039.x. 2007.
- WALLER, L.A., GOTWAY, C.A. *Applied Spatial Statistics for Public Health Data*. John Wiley and Sons, New Jersey, 2004. 494 p.
- WANG, M.; HJELMFELT, A.; GARBREC R. J. DEM aggregation for watershed modeling. *Journal of the American Water Resources Association*. v.36, n. 3. p. 579-584. 2000.
- WANG, Y.; CHIN, K-S.; LUO, Y. Aggregation of direct and indirect judgements in pairwise comparison matrices with a re-examination of the criticisms by Bana e Costa e Vansnick. *Information Sciences* 179(3): p. 329–337. 2009.
- WCED. *Our Common Future*. Oxford University Press, New York. 1987.
- WEBER, M., EISENFUHR, F., AND VON WINTERFELDT, D. The Effects of Splitting Attributes on Weights in Multiattribute Utility Measurement. *Management Science*, 34, p. 431-445. 1988.
- WILSON, J. P. AND GALLANT. J. C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, New York, 2000. 479 p.
- WORLD CLIMATE, 2005. Disponível em : www.worldclimate.com. Acesso em: 31/10/2013.
- WRIGHT, J. T. C.; GIOVINAZZO, R. A. “Delphi: uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo”, *Caderno de Pesquisas em Administração*, v. 1, n. 12, 2000.

- XAVIER, A. C. P.; LOBO, R. F. SIG: análise de aplicabilidade em avaliações ambientais integradas. XVI ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS. Anais... Porto Alegre, 2010.
- XAVIER, C. F. Avaliação da Influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba – Paraná. 2005. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná. UFPR, Curitiba.
- XIMENES, A. C. Mapas auto-organizáveis para a identificação de ecorregiões do interflúvio Madeira-Purus: uma abordagem da biogeografia ecológica. (INPE-15332-TDI/1372). 2008. 155 p. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18%4080/2008/08.18.14.02/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 27/8/2103.
- XIONG YING, ZENG GUANG-MING, CHEN GUI-QIU, TANG LIN, WANG KE-LINC, HUANG DAO-YOUC . Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—A case study of Hunan Province, China. *ecological modelling* 209, p. 97–109. 2007.
- YANG, M.; QIAN, X.; ZHANG, Y.; SHENG, J.; SHEN, D. Assessing Alternatives for Sustainable Management of A Flood Control Dam. *Procedia Environmental Sciences* 2, p. 98–110. 2010.
- YI, C. S.; LEE, J. H.; SHIM, M. P. Site location analysis for small hydropower using geospatial information system. *Renewable Energy*, 35, p. 852-861, 2010.
- YUNG-CHI SHEN; LIN, G. T. R.; LI, KUANG-PIN; YUAN, B. J. C. An assessment of exploiting renewable energy sources with concerns of policy and technology. *Energy Policy* 38, p. 4604–4616. 2010.
- ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO NA LOCALIZAÇÃO DE USINAS TERMOELÉTRICAS UTILIZANDO SIG. versão impressa ISSN 0101-7438 / versão online ISSN 1678-5142. 2005.
- ZARRIN, H.; SHARIFI, F.; VAFAKHAH, M.; MAHDIAN, M. H. Regional analysis of low flow in Karkheh and Karoon Watersheds. *Journal of Applied Sciences*, vol. 9, ed. 6, p. 1141-1146, 2009.
- ZHAN, X; HUANG, M. ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling & Software*. V. 19, n. 10, p. 875-879, 2004.